

MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DE  
LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

PRESENTADO POR:

JORGE MARIO GALLARDO ESCOBAR Código: 1030334

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA

DIRECTOR:

ING. ALDEMAR REYES TRUJILLO. M Sc

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERIA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
Santiago de Cali  
2015



*Modelación de la Dinámica del Agua en el Suelo en la Parcela  
Experimental de la Universidad del Valle*

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del evaluador

---

Firma del evaluador

*“Agua para todos, pero no para todo... Optimizar este recurso natural y evitar el derroche  
será la única solución para las necesidades del 2030”. José Luis Gallego.*

## **DEDICATORIA**

*A la fe que siempre estuvo presente, para lograr las cosas frente a cualquier adversidad que  
se presente.*

*A mis padres Olga Teresa Escobar, Jorge Eliecer Gallardo y a toda mi familia por apoyarme  
en este proceso, confiar en mí.*

*A mis amigos Camilo, Jhon, Michael, y demás compañeros que siempre de una u otra forma  
estuvieron pendientes ayudándome, aconsejándome.*

*¡MUCHAS GRACIAS!*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis papas y a toda mi familia por su compañía y apoyo siempre durante toda mi formación profesional.

A la Universidad del Valle por haberme dado la oportunidad de formarme como ingeniero Agrícola, por brindarme la ayuda y los espacios necesarios para el desarrollo de este trabajo y los demás realizados fuera y dentro del campus.

A mi director, ingeniero Aldemar Reyes Trujillo por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, su confianza, apoyo, paciencia, orientación y consejos.

A Los Profesores Harold Tafurt, Waldemar Peñarete, Martha Constanza Daza y Yesid Carvajal por su colaboración, aportes y sugerencias.

A todas las personas que componen el Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA), por su afectuoso recibimiento, su acompañamiento, colaboración y apoyo en las actividades de este proyecto.

A la junta evaluadora de este trabajo, el profesor Harold Tafurt y Waldemar Peñarete por sus observaciones y aportes.

A Catherine Gómez, laboratorista encargada del laboratorio de aguas y suelos agrícolas de la Universidad del Valle LASA, por su disponibilidad, asesorías y orientaciones y al señor Ever Hernández por su acompañamiento y asesorías en los procesos de investigación de este proyecto.

A los profesores del área académica de ingeniería agrícola y de la escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente, por mi formación como ingeniero.

A todos mis amigos de la universidad del programa académico de ingeniería agrícola y de las demás facultades y programas que de una u otra forma contribuyeron a la culminación de este proyecto gracias por su amistad y por los momentos que se vivieron que nunca se olvidaran.

*Jorge Mario Gallardo Escobar*

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
TABLA DE CONTENIDO .....	5
INDICE DE TABLAS .....	8
INDICE DE FIGURAS .....	9
RESUMEN .....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. JUSTIFICACIÓN .....	14
3. OBJETIVOS .....	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	16
4. MARCO TEÓRICO .....	17
4.1. DEFINICIÓN DE SUELO .....	17
4.2. PROPIEDADES FÍSICAS ASOCIADAS A LA REGULACIÓN HÍDRICA DEL SUELO .....	19
4.2.1. ESTRUCTURA DEL SUELO. ....	19
4.2.1.1. FLOCULACIÓN .....	19
4.2.1.2. ORIGEN E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.....	20
4.2.2. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL .....	21
4.2.3. TEXTURA DEL SUELO .....	21
4.2.4. DENSIDAD DEL SUELO .....	22
4.2.4.1. PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD REAL DEL SUELO .....	23
4.2.4.2. PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD APARENTE (Da) .....	23
4.2.5. POROSIDAD .....	24
4.2.5.1. TIPOS DE POROSIDAD EN EL SUELO .....	24
4.3. PROPIEDADES QUÍMICAS ASOCIADAS A LA REGULACIÓN HÍDRICA DEL SUELO.....	25
4.3.1. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (C.I.C.) .....	25
4.3.2. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO .....	26
4.4. PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO.....	27
4.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO .....	27

4.4.1.1.	RETENCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO.....	29
4.4.1.2.	LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO .....	31
4.4.2.	MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO .....	32
4.4.2.1.	INFILTRACIÓN .....	33
➤	FACTORES QUE AFECTAN LA INFILTRACIÓN .....	33
4.4.2.2.	LA PERMEABILIDAD .....	34
➤	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO .....	35
4.5.	TENDENCIAS SOBRE LA MODELACIÓN EN SUELOS AGRICOLAS .....	36
5.	MÉTODOS Y MATERIALES .....	40
5.2.	DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DE UNIVERSIDAD DEL VALLLE .....	41
5.2.1.	MUESTREO DE SUELOS .....	41
	CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD.....	44
5.3.	APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EN LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO. ....	44
5.3.1.	HYDRUS -2D .....	45
5.3.1.1.	ASPECTOS TÉCNICOS DEL MODELO HYDRUS-2D .....	46
5.4.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS (ANÁLISIS DE DATOS) .....	49
5.4.1.	PRUEBA F .....	49
5.4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE T-STUDENT.....	50
5.4.3.	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON .....	51
5.4.4.	ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE .....	52
5.5.	REPRESENTACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO.....	53
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	56
6.1.	Caracterización inicial del suelo.....	56
6.1.1.	Caracterización del suelo. ....	56
6.2.	Caracterización Físico-Química del suelo.....	57
6.2.1.	Textura .....	58
6.2.2.	Densidad aparente .....	59

6.2.3.	Estabilidad de Agregados .....	61
6.2.4.	Porosidad .....	63
6.2.5.	Materia Orgánica .....	65
6.2.6.	Capacidad de intercambio Catiónico (CIC) .....	66
6.2.7.	Infiltración .....	66
6.2.8.	Conductividad Hidráulica Saturada .....	67
6.3.	Aplicación herramientas computacionales (software Hydrus-2D) en la determinación de la Conductividad Hidráulica Saturada (Ks) y la estimación de la curva característica de retención de humedad.....	68
6.4.	Análisis de comparación de los resultados de las propiedades hidrofísicas medidas mediante módulos estadísticos frente a las determinadas experimentalmente. ....	70
6.4.1.	Simulación de la Conductividad hidráulica (Ks). ....	70
6.4.2.	Curva de Retención de Humedad.....	73
6.4.2.	Relación Lineal entre la Conductividad Hidráulica y algunas Propiedades Físicas del Suelo .....	74
6.5.	Representación de la variabilidad espacial del comportamiento de la Conductividad Hidráulica (Ks) del suelo de la Parcela Experimental de la Universidad del Valle L.A.S.A. 2015 .....	76
7.	CONCLUSIONES.....	77
8.	RECOMENDACIONES .....	81
9.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	83
10.	BIBLIOGRAFÍA .....	84
11.	ANEXOS.....	98

TABLA 1. DEFINICIÓN DE LOS SEPARADOS DEL SUELO. ....	21
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS SEPARADOS DEL SUELO, SEGÚN EL SISTEMA USDA. ....	22
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS POROS DEL SUELO, SEGÚN SU TAMAÑO.. ....	24
TABLA 4. EFECTO GENERAL DE LA MATERIA ORGÁNICA SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO. ....	27
TABLA 5. COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO CON RESPECTO A SU CONTENIDO DE MATERIALES COLOIDALES. ....	31
TABLA 6. MÉTODOS A UTILIZAR EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ASOCIADAS A LA REGULACIÓN HÍDRICA PARA UN TOTAL 40 MUESTRAS REPRESENTATIVAS. ....	43
TABLA 7. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE HYDRUS 2D Y LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN DE PARÁMETROS RELACIONADOS A LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD. ....	47
TABLA 8. COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV %) PARA ALGUNAS PROPIEDADES COMUNES DEL SUELO, EN EL HORIZONTE A, EVALUADAS CON MUESTRAS TOMADAS BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES Y DE USO, EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, CALCULADOS CON BASE EN DATOS DE IGAC. ....	54
TABLA 9. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUELO EN PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS L.A.S.A. 2015 .....	56
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO. ....	57
TABLA 11. AGRUPACIÓN GENERAL DE CLASES TEXTURALES DE ACUERDO CON SU SIMILITUD EN EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO.. ....	58
TABLA 12. DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍAS USADAS PARA LA COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE. ....	60
TABLA 13. FLUCTUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BÁSICA SEGÚN LA TEXTURA DEL SUELO .....	66
TABLA 14. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS DIFERENTES CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS DETERMINADAS EN PROFUNDIDAD POR DIFERENTES METODOLOGÍAS. LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS L.A.S.A., 2015. ....	68
TABLA 15. CORRELACIÓN DE DIFERENTES CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS SIMULADAS A PARTIR DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL POZO INVERTIDO PARA 5 MUESTRAS EXPERIMENTALES A 30 CM DE PROFUNDIDAD EN EL SUELO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO L.A.S.A. EN EL AÑO 2015 .....	71



## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FASES DEL SUELO.....	18
FIGURA 2. RELACIÓN TEÓRICA GENERAL ENTRE EL CONTENIDO DE COLOIDES Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO, A UNA FUERZA DE RETENCIÓN CONSTANTE. 28	
FIGURA 3. EFECTO DEL TIPO DE ARCILLA DEL SUELO, SOBRE SU CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE HUMEDAD (CONTENIDO GRAVIMÉTRICO DE HUMEDAD; A.A: AGUA APROVECHABLE; C.C.: CAPACIDAD DE CAMPO; P.M.P.: PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE). ....	28
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS POTENCIALES COMPONENTES DEL POTENCIAL TOTAL DEL AGUA DEL SUELO, EN UN SUELO NO EXPANSIVO.....	30
FIGURA 5. EFECTO TEÓRICO DE LA TEXTURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO.....	31
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA FRENTE A LA HUMEDAD DE DOS TIPOS DE SUELO .....	35
FIGURA 7. IMAGEN SATELITAL DE LA GRANJA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE.. .....	40
FIGURA 8. UBICACIÓN GEOGRÁFICA PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS LASA DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2015.....	41
FIGURA 9. METODOLOGÍA DE UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE HYDRUS -2D.....	45
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT.....	50
FIGURA 11. MEDICIÓN EN CAMPO A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LA DENSIDAD APARENTE EN HÚMEDO (TAFURT, 2014) EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS L.A.S.A. 2015. ....	59
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA DENSIDAD APARENTE DEL SUELO EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS L.A.S.A. 2015.....	61
FIGURA 13. CURVA CARACTERÍSTICA DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS PARA LA PARCELA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE L.A.S.A. - 2015. ....	62
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LA POROSIDAD DEL SUELO EVALUADA A DOS PROFUNDIDADES EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS L.A.S.A. 2015. .....	64
FIGURA 15. CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO ARCILLOSO PARA UNA PROFUNDIDAD DE 30 CM, SIMULADA A TRAVÉS DEL SOFTWARE HYDRUS-2D. ...	73
FIGURA 16. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL PARA LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA, EN LA PARCELA EXPERIMENTAL L.A.S.A. DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2015.....	76
FIGURA 17. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADA EN HYDRUS 2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS	

RESPECTIVAMENTE) A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO DE VAN GENUCHTEN(1980) - MUALEM (1976). ....	988
FIGURA 18. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADA EN HYDRUS 2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS RESPECTIVAMENTE A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO DE VAN GENUCHTEN(1980) - MUALEM (1976) USANDO REDES NEURONALES DE ROSETTA-LITE. .....	999
FIGURA 19. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADA EN HYDRUS-2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS RESPECTIVAMENTE A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO MODIFICADO DE VAN GENUCHTEN(1980) - MUALEM (1976). ....	100
FIGURA 20. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADA EN HYDRUS-2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS RESPECTIVAMENTE A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO MODIFICADO DE VAN GENUCHTEN(1980) - MUALEM (1976) USANDO REDES NEURONALES DE ROSETTA -LITE. ....	1011
FIGURA 21. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADAS EN HYDRUS-2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS RESPECTIVAMENTE) A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO BROOKS-COREY (1964). ....	1022
FIGURA 22. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD SIMULADAS EN HYDRUS-2D PARA CINCO TIPOS DE TEXTURA (FRANCO ARCILLOSOS ARENOSO, FRANCO, FRANCO ARCILLOSOS RESPECTIVAMENTE) A UNA PROFUNDIDAD DE 30CM CON EL MODELO KOSUGI LOGNORMAL (1996). ....	1033

## RESUMEN

Por su influencia en la explotación agrícola, la conductividad hidráulica es considerada una de las propiedades hídricas más relevantes para la agricultura. Se encuentra directamente relacionada con las propiedades estructurales y texturales del suelo, las cuales resultan de los procesos de formación y manejo. Por esta razón, es importante la evaluación de dichas propiedades a través de diferentes metodologías experimentales y de simulación en ordenador. Para este fin se evaluaron las propiedades hidrofísicas asociadas a la regulación hídrica del suelo en la parcela experimental del laboratorio de suelos y aguas LASA de la Universidad del Valle a través de 40 puntos de muestreo en un área de 1000 m<sup>2</sup>, identificando que el valor de la Conductividad Hidráulica Saturada experimental tiene gran dependencia de estas. Con el fin de comparar los resultados de Conductividad Hidráulica Saturada se utilizó en paquete de ordenador Hydrus -2D el cual es un modelo que simula el valor de la Conductividad Hidráulica Saturada y arroja la Curva de Retención de Humedad para cualquier tipo de suelo a través del ingreso de valores de parámetros tales como la textura, la densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, entre otros; para el caso en particular los análisis solo identificaron correlaciones de Pearson del 60% del modelo frente a los datos obtenidos experimentalmente. El Modelo de Regresión Múltiple arrojó que existe gran dependencia de las propiedades físicas del suelo con coeficientes de determinación superiores al 75%, donde se cabe destacar que la Materia Orgánica tiene un juego un papel importante en el comportamiento de la Conductividad Hidráulica Saturada, la cual no se tiene en cuenta en los análisis del software y que propone considerarla por algunos autores. Para identificar la variabilidad de la conductividad hidráulica saturada en el área de estudio se utilizaron los sistemas de información geográfica a través de uso de los conceptos de la geoestadística y los métodos de interpolación de datos, para tal fin se tomaron 5 muestras experimentales en el área de estudio, identificando una conductividad hidráulica saturada de moderadamente lenta a moderada y poca variabilidad en la zona de estudio.

Palabras clave: propiedades hidrofísicas, conductividad hidráulica saturada, software Hydrus 2-D, geoestadística, interpolación tipo Kriging.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura es fundamental el mejoramiento de la calidad del diagnóstico del funcionamiento hidráulico del suelo con la finalidad de elaborar mejores estrategias de manejo; además, es relevante encontrar indicadores confiables y prácticos para el estudio de la evolución de los suelos en general, y de la dinámica del agua edáfica en particular. De acuerdo con (Rubio, 2005) citando las palabras de (Schofield, 1935), la medición de las propiedades hidrofísicas de un suelo, permite conocer los cambios ocurridos como consecuencia de las diferentes prácticas de manejo.

Para unas condiciones óptimas del suelo en función del desarrollo de las plantas, se debe presentar una estructura estable capaz de permitirle a estas la expresión de su potencial de crecimiento, sobre todo en el sistema de raíces, sin impedimentos para la exploración del mayor volumen de suelo posible. Ello implica: condiciones de superficie con buena estabilidad de agregados para una correcta entrada y circulación de agua-aire, transferencia de calor en el suelo, buena capacidad de almacenaje de agua y libre movimiento de la solución agua más nutrientes desde el suelo a la raíz y ausencia de limitaciones, ya sean genéticas (naturales) o inducidas, en la profundidad del suelo para el desarrollo de raíces. (FAO, 2000)

De esta manera, se empezaron a desarrollar métodos para el conocimiento y estudio de los factores externos al suelo que, en mayor o menor grado, influyen en la variabilidad de los procesos de infiltración, drenaje y escorrentía según autores como, (Hills y Reynolds, 1969; Moore *et al.*, 1988). En las últimas décadas se ha experimentado una creciente mejora de los métodos y técnicas de medida directa de las propiedades hidrofísicas (Gee y Ward, 1999).

Actualmente algunos de estos avances técnicos son por ejemplo los métodos que utilizan tensiómetros de célula corta, que permiten el registro en continuo en un amplio rango de profundidades de medida como lo exponen los autores (Miller y Salehzadeh, 1993; Hubble y Sisson, 1996) y la medición de la conductividad hidráulica, con mejoras en los infiltrómetros y permeámetros como lo destacan (Reynolds y Elrick, 1985; Ankey *et al.*, 1988); (Wang *et al.*, 1998).

Otro avance importante es el de la solución, estimación y simulación de estas propiedades a través de programas computacionales cuyo objetivo es obtener representaciones con la mayor precisión posible sobre la transmisión del flujo hídrico, tanto de carácter superficial como en el medio poroso, tales como Hydrus que viene en tres versiones en una, dos y tres dimensiones para el estudio de las propiedades del suelo y diferentes paquetes de software creados por el departamento de agricultura de los Estados Unidos.

Con el fin de evaluar las propiedades hidrofísicas del suelo particularmente en la Parcela Experimental de la Universidad del Valle sede Meléndez, se buscó la aplicación e implementación estas herramientas, en este caso, los programas computacionales de modelación en suelo, donde para el caso en particular se utilizó el programa desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S.D.A.), llamado Hydrus -2D (Simunek *et al.*, 1998) el cual brinda información y simula las propiedades y la dinámica de flujos unidimensionales solucionando la ecuación de Richards (Richards, 1931).

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se habla de un manejo sustentable de los recursos naturales, lo cual depende del uso racional y dedicado del ser humano, ya los recursos (suelo y agua) han sido a través del tiempo degradados y explotados por este para su propio beneficio, en actividades como la agricultura, la mecanización excesiva, ganadería y la urbanización, aspectos que han llevado a los suelos a una acelerada pérdida de la fertilidad (Zuñiga et al., 2009) provocando fenómenos como la erosión, la compactación, escases, entre otros. (Pérez et al., 2010). En Colombia, la vocación del uso del suelo es cambiante. Es de tenerse en cuenta que el 43,5% del territorio es destinado para acciones conservacionistas, seguido por la actividad agrícola, forestal, ganadera y agroforestal (IGAC y CORPOICA, 2002)

Colombia es un país con inmensa riqueza hídrica, configurada por la disponibilidad de fuentes superficiales y subterráneas. En total el país tiene una dotación promedio de 2100 km<sup>3</sup> de agua fresca (50.000 m<sup>3</sup>/año/hab) cifra que supera ampliamente el suministro de países como Brasil, Argentina y México (BM, 2007). La dotación de aguas subterráneas es importante pues se estima que el 30% de la oferta de agua dulce total proviene de este tipo de fuentes y además cerca del 40% de los municipios del país dependen únicamente de acuíferos para el abastecimiento de agua potable (IDEAM, 2010).

La importancia del recurso hídrico en el suelo es básicamente uno de los factores que actualmente se considera en el análisis de la fertilidad del suelo. El buen manejo del agua está dirigido a maximizar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo (FAO, 2005). El conocimiento de las leyes que rigen el movimiento del agua en el suelo es fundamental para las ciencias agrarias. Esto es así debido a la importancia del agua para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Ahora bien, tan importante como la existencia de una cantidad no limitante de agua es la existencia de una dinámica apropiada de esta sustancia.

La función de retención y conductividad hidráulica, vinculadas a la estructura del suelo se han valorado estudiando el contenido de humedad y la velocidad de infiltración respectivamente. Esta función interrelaciona los ecosistemas con la regulación de los flujos hidrológicos en la superficie de la tierra (De Groot *et al.*, 2000); en el caso específico del suelo, lo vincula con los movimientos de agua dentro del perfil edáfico, tanto en sistemas naturales como manejados.

La retención de agua y la dinámica de flujo son los principales impulsores del crecimiento de la vegetación e influyen, de forma determinante, en la comunidad microbiana establecida en este medio, el ciclo de nutrientes y el transporte de contaminantes (Hawsad *et al.*, 2004). En particular, la infiltración es un proceso clave en el control de la interfase suelo-agua, clave en el transporte de nutrientes y vital para la nutrición de las plantas.

El conocimiento de la dinámica de las propiedades químicas y físicas de los suelos relacionadas con la dinámica del agua en el mismo, son de vital importancia en la preservación y manejo sostenible de los recursos naturales. Por lo anterior se buscó innovar con la aplicación de herramientas computacionales que permitan conocer el comportamiento de las propiedades hidrofísicas del suelo, donde en muchos análisis se utilizan como una herramienta predictiva para simular con precisión espacial los lugares donde se va a manifestar algún tipo de cambio de usos de suelo, funcionando realmente como prototipos excelentes para localizar patrones de comportamiento, además de señalar las áreas donde potencialmente podría producirse algún cambio en el futuro de acuerdo a estas reglas localizadas, permitiendo determinar variables de gran importancia en la dinámica del agua en el suelo, como la capacidad de almacenamiento, lámina y la curva característica propia de retención de humedad, ya que partir de sus diversos análisis se podrán establecer lineamientos de protección, para el uso adecuado y eficiente promoviendo el desarrollo de formas sostenibles de agricultura.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de propiedades hidrofísicas del suelo aplicando herramientas computacionales en la parcela experimental de la Universidad del Valle.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 3.2.1. Determinar las propiedades hidrofísicas del suelo en la parcela experimental de la Universidad del Valle.
- 3.2.2. Aplicar herramientas computacionales en la determinación de la capacidad de regulación de agua en el suelo (Conductividad Hidráulica Saturada) mediante la estimación de la curva característica de retención de humedad.
- 3.2.3. Comparar los resultados de las propiedades hidrofísicas obtenidas mediante módulos estadísticos con las obtenidas experimentalmente.
- 3.2.4. Representar mediante el uso de herramientas de información la variabilidad espacial del comportamiento hidrodinámico del suelo de la Parcela Experimental de la Universidad del Valle.



## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. DEFINICIÓN DE SUELO

La definición del suelo ha tenido varios matices, según quien trate de hacerla y según la época en que la haga. Como lo reportan, Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993); Porta et al., (1994); Malagón *et al.*, (1995); Buol *et al.*, (1997); Hillel (1998), y entre otros autores, el término suelo ha tenido acepciones verdaderamente simplistas como:

teorico

- ✓ El suelo es, desde el punto de vista del agricultor, el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949).
- ✓ Para un geólogo podría ser el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso.
- ✓ Para un constructor, el suelo es el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas.
- ✓ Para un ecólogo es uno de los componentes del ecosistema que estudia.
- ✓ Para un químico, es el laboratorio donde se producen reacciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa.
- ✓ Un antropólogo o un arqueólogo podrán ver el suelo como un tipo de registro del pasado.

A continuación a partir de estas definiciones encaminadas se definió el suelo hacia finales del siglo XIX, Dokuchaev en 1886, según trabajo de Vilenskii (1957), citado por Buol *et al.*, (1997), propuso que el término suelo se utilizará para definir “aquellos horizontes de la roca que diaria o casi diariamente cambian sus relaciones bajo la influencia conjunta del agua, el aire y varias formas de organismos vivos y muertos (biológicamente activa).

De forma técnica se define la relación suelo-planta-atmosfera

- La fase sólida, compuesta por el conjunto de las partículas inorgánicas (cristalinas y no cristalinas) y las orgánicas.
- La fase líquida, que la componen el agua y los solutos que están disueltos en ella, es decir, la fase líquida es, en realidad, una solución: la solución del suelo.
- La fase gaseosa, constituida por lo que se conoce como atmosfera o aire del suelo (25%). En ella, el oxígeno que entra en su composición es indispensable para la respiración de las raíces de las plantas y por lo tanto para adquirir un desarrollo correcto. Si el suelo tiene una pobre aireación, la absorción de agua y nutrientes por planta queda notablemente disminuida, con la consiguiente repercusión en su producción, incluso en suelos bien abastecidos de elementos nutrientes asimilables (Blaya y García, 2003)

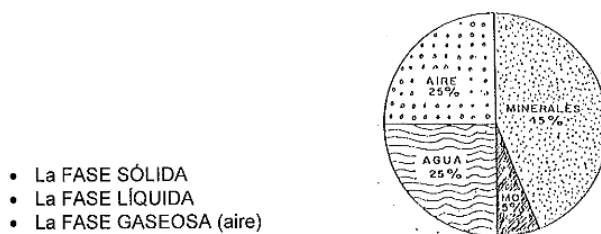


Figura 1. Fases del suelo. Tomado de (Jaramillo, 2002).

La manera cómo interactúan las fases mencionadas define el campo de actividad de la Física de suelos: al definir la composición y la organización de la fase sólida, queda definido, también, el espacio que van a ocupar las otras dos fases.

Al entender las relaciones planteadas se puede, entonces, hacer un uso y un manejo racionales del agua, de la aireación y del espacio para las raíces, evitándose problemas de compactación y de erosión, es decir, de degradación física del suelo.

Se puede considerar un suelo de manera ideal:

El 50% está ocupado por poros. De este porcentaje, el 25% está ocupado por poros para aire (un porcentaje de aire del 10 es considerado insuficiente para las funciones de vida) y el otro

25% para el agua. El 50% restante está ocupado por la fase sólida, donde el 5% representa la fracción orgánica. (López, 2009)

## **4.2. PROPIEDADES FÍSICAS ASOCIADAS A LA REGULACIÓN HÍDRICA DEL SUELO**

Son de gran importancia debido a que la interacción de estas son las que determinan en gran medida las relaciones de uso y manejo racionales que el hombre hace con estas. Casi todos los suelos son mezclas de partículas minerales, materia orgánica en varios grados de descomposición, iones y elementos químicos, agua y aire, en proporciones variables.

### **4.2.1. ESTRUCTURA DEL SUELO.**

Las partículas sólidas del suelo se unen entre sí de diversas formas, generando unidades de mayor tamaño llamadas agregados, unidades estructurales o peds. El arreglo que se produce con estos sólidos se denomina estructura del suelo (Hillel, 1998).

#### **4.2.1.1. FLOCULACIÓN**

Es el proceso mediante el cual se unen las partículas sólidas del suelo entre sí, obedeciendo a diferentes mecanismos físico-químicos. Ésta es realizada, generalmente, por fuerzas electrostáticas entre aquellas partículas y otros elementos del suelo como el agua o los cationes; esta unión no es permanente en el tiempo y puede desaparecer fácilmente, al cambiar las condiciones que la producen. También se puede producir mecánicamente, mediante la acción de raicillas de plantas o de hifas de hongos (Baveret al., 1973); este último tipo se ha llamado, algunas veces, bioestructura.

En el suelo este fenómeno se presenta muy influenciado por la presencia de cationes polivalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , etc.), los cuales actúan como puente entre las partículas sólidas cargadas negativamente o entre moléculas de agua unidas a las partículas. A igual concentración de iones, el de mayor carga domina el proceso y su efecto es más rápido y produce flóculos más grandes, entre mayor sea la carga.

Un problema práctico inherente a la floculación es que puede alterar la determinación de la textura del suelo al impedir que se mantenga la dispersión del suelo durante todo el tiempo que dura el análisis, debido a que partículas de determinados tamaños se unen entre sí, formando pseudo-agregados de tamaños mayores que, obedeciendo a la ley de Stokes, sedimentan con una velocidad mayor que aquella a la cual lo harían las partículas individuales.

#### 4.2.1.2. ORIGEN E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Para que se consolide una unidad estructural o ped, se requiere que haya inicialmente floculación. Para que los flóculos se mantengan unidos y estables frente a las condiciones adversas del medio, se requiere que las partículas que ya están unidas sean cementadas entre sí. Esta acción la realizan los coloides del suelo (arcillas, humus, óxidos de hierro y de aluminio) (Baver *et al.*, 1973).

En el desarrollo de la estructura del suelo intervienen varios agentes como:

- Los macro y microorganismos, tanto animales como vegetales, los cuales ejercen una agrupación de partículas mecánicamente por medio de sus hifas o de las raicillas. Estos organismos, luego, ayudan a cementar las partículas entre sí, con sus exudados o con los productos de su descomposición. Como se ha mencionado anteriormente, ésta es la bioestructura y es frecuente en los horizontes superficiales de suelos desarrollados bajo praderas de gramíneas cuyas raíces ocupan densa y completamente esa porción del suelo. También se consideran como bioestructura los pseudoagregados formados por los excrementos de las lombrices; cabe destacar que estas unidades son de corta duración pues su estabilidad es muy baja.
- Los ciclos de humedecimiento y secamiento son indispensables para que se produzca la deshidratación progresiva de los coloides y la cementación final de los agregados.
- La compresión, los iones, las sales y los coloides ejercen efectos mecánicos y químicos sobre las partículas del suelo, uniéndolas y cementándolas.
- El manejo del suelo. Es un factor de especial importancia, sobre todo en lo relacionado con la conservación de la estructura del suelo; sus efectos se tratarán más ampliamente en apartes posteriores (Baver *et al.*, 1973).

La estructura del suelo es una de sus principales propiedades, ya que el arreglo que presente la fase sólida está determinando el espacio que queda disponible para las otras dos fases de éste: la líquida y la gaseosa; puede decirse que esta propiedad es la que controla las interrelaciones entre las diferentes fases físicas del suelo y la dinámica de líquidos y gases en él, donde tiene una influencia directa en propiedades como porosidad, densidad aparente, régimen hídrico, régimen térmico, permeabilidad, aireación, distribución de la materia orgánica, entre otras; por lo anterior, no es casual que se estime la degradación de un suelo de acuerdo con el grado de deterioro de su estructura (Baver *et al.*, 1973).

La estructura puede mitigar los efectos nocivos que puede tener la textura en el medio físico del suelo; así por ejemplo, un suelo bien estructurado puede reducir, y hasta eliminar, los problemas de mal drenaje, baja permeabilidad y poca aireación inducidos por el

empaquetamiento fuertemente ajustado de los separados que se presenta en un suelo de textura fina (Baver et al., 1973).

#### 4.2.2. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

Aunque la formación de la estructura es un proceso fundamental en el suelo, su persistencia frente a agentes perturbadores del medio es indispensable para tener un medio físico edáfico adecuado; la estabilidad estructural es la que define en gran medida, la intensidad y el tipo de uso y manejo y, desde el punto de vista del manejo intensivo del suelo, ésta es una de las propiedades que mejor deben conocerse, ya que es la que más determina su resistencia al deterioro y a la erosión (Ingelmo y Cuadrado, 1986).

Los principales agentes que perturban la estructura son las gotas de lluvia, la mecanización, la presencia de ciertos cationes como el sodio, las condiciones inadecuadas de humedad y el déficit de coloides en el suelo, entre otros (Jaramillo, 2002).

La estabilidad estructural de un suelo está controlada por los mismos factores que contribuyen a la estructuración, pudiéndose destacar que, a mayor contenido de arcilla y de materia orgánica, hay mayor estabilidad (Ingelmo y Cuadrado, 1986); a menor laboreo y mayor población microbiana, mayor estabilidad (Utomo y Dexter, 1982), a mayores revestimientos de los peds con óxidos de hierro y aluminio, mayor estabilidad (Sanchez, 1981).

#### 4.2.3. TEXTURA DEL SUELO

La textura es una propiedad exclusiva de la fase sólida del suelo y, más específicamente, de la fracción inorgánica de aquella. La textura es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la tierra fina, en el suelo; estas partículas, llamadas separados, se agrupan en tres clases, por tamaños: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar) y son definidas como se muestra en la Tabla 1, según varias instituciones internacionales (Montenegro y Malagón, 1990).

Tabla 1. Definición de los separados del suelo.

SEPARADO	RANGO DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA ( mm )		
	USDA	ISSS*	DIN y BSI**
ARENA	2 - 0.05	2 - 0.02	2 - 0.08
LIMO	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002	0.08 - 0.002
ARCILLA	< 0.002	< 0.002	< 0.002

\* Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo.

\*\* DIN: Instituto Alemán de Estándares; BSI: Instituto Británico de Estándares.

Tomado de (Montenegro y Malagón, 1990).

De la tabla presentada anteriormente, se observa la coincidencia que hay entre los diferentes sistemas, al establecer el límite de tamaño para las arcillas. Esto obedece a las notorias diferencias de comportamiento fisicoquímico de estas partículas, con respecto a las de la arena y el limo.

El sistema de clasificación más aceptado en nuestro medio es el que propone el USDA, el cual subdivide los separados en los rangos que se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los separados del suelo, según el sistema USDA. Tomado de (Mejía, 1983).

SEPARADO	RANGO DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA	
	mm	µm
Arena muy gruesa	2 - 1	2000 - 1000
Arena gruesa	1 - 0.5	1000 - 500
Arena media	0.5 - 0.25	500 - 250
Arena fina	0.25 - 0.1	250 - 100
Arena muy fina	0.1 - 0.05	100 - 50
Limo grueso	0.05 - 0.02	50 - 20
Limo medio	0.02 - 0.005	20 - 5
Limo fino	0.005 - 0.002	5 - 2
Arcilla gruesa	0.002 - 0.0002	2 - 0.2
Arcilla fina	< 0.0002	< 0.2

El tamaño de las partículas que predominan determina la textura del suelo; se dice que un suelo es de textura gruesa cuando las partículas predominantes son de tamaño grande; en cambio, los suelos de textura fina son aquellos cuyas partículas predominantes son las de menor tamaño. (Mejía, 1983).

La textura del suelo tiene especial significado en: aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, erodabilidad, uso y manejo (Jaramillo, 2002).

#### 4.2.4. DENSIDAD DEL SUELO

La densidad de un material se define como el peso que tiene dicho material, por unidad de volumen. El suelo como todo cuerpo poroso tiene dos densidades. La densidad real (densidad media de sus partículas sólidas) y la densidad aparente (teniendo en cuenta el volumen de poros)(Jaramillo, 2002).

#### 4.2.4.1. PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD REAL DEL SUELO

Es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, siendo más o menos constante, está determinada por la composición química y mineralógica de la fase sólida según (Forsythe, 1975), (Motta *et al.*, 1990), (Montenegro y Malagón, 1990).

La densidad real se determina a partir de la ecuación 1:

$$Dr = \frac{P_{ss}}{V_s} \text{ Ecuación 1}$$

Dónde:

P<sub>ss</sub>=muestra de suelo seco al horno V<sub>s</sub>= volumen que ocupan los sólidos en la muestra de suelo

#### 4.2.4.2. PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD APARENTE (Da)

La densidad aparente se define como el peso de una unidad de volumen de suelo que incluye su espacio poroso.

La densidad aparente refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos (refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire). También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio (expresados en % en peso) a valores de % en volumen en el campo. (Jaramillo, 2002).

#### IMPORTANCIA DE LA Da

El valor de la densidad aparente es un parámetro necesario en varios cálculos relacionados con el suelo, como son: el cálculo del peso de un determinado volumen de suelo, la transformación del contenido de humedad gravimétrico del suelo, a contenido volumétrico y el cálculo de la porosidad total del suelo, cuando se conoce su densidad real.

Aparte de lo anterior, es un estimador del grado de compactación del suelo, ya que si se está presentando este problema, la densidad aparente se incrementa; también es un indicador de altos contenidos de materia orgánica en el suelo, puesto que ellos reducen el valor de dicha densidad.

#### 4.2.5. POROSIDAD

La porosidad total del suelo es el volumen de éste que no está ocupado por sólidos; es el volumen que hay disponible en el suelo para los líquidos y los gases (Jaramillo, 2002).

##### 4.2.5.1. TIPOS DE POROSIDAD EN EL SUELO

La distribución del espacio poroso depende de la composición y arreglo de la fracción sólida, es decir, de la textura, del contenido de materia orgánica y de la estructura, definiéndose dos tipos de espacios porosos:

- Microporosidad o Porosidad textural, está compuesta por el volumen de los poros más finos que tiene el suelo y que, en su mayor cantidad se encuentran en el interior de los peds. (SSDS, 1993).
- Macroporosidad o Porosidad estructural, es el volumen de poros grandes del suelo, los cuales se encuentran, en mayor proporción, ubicados entre los peds (SSDS, 1993).

La diferenciación anterior tiene su máxima importancia, cuando se considera la función específica de cada tipo de porosidad, ya que los macroporos son los responsables de la circulación del agua, sobre todo cuando está en exceso, y del aire en el suelo, en tanto que los microporos son los encargados de almacenar agua dentro del mismo.

De las consideraciones anteriores se deduce que, más importante que conocer la porosidad total del suelo, es conocer la distribución de los poros de diferentes tamaños. La proporción en que se encuentren los diferentes tamaños es la que controla las relaciones fundamentales entre las fases sólida - líquida - gaseosa, influyendo grandemente en cualidades edáficas como drenaje, infiltración, almacenamiento de agua, aireación, temperatura, etc. (SSDS, 1993).

Para agrupar los poros del suelo, de acuerdo al tamaño que presenten, se han propuesto varias clasificaciones, como la que puede verse en la Tabla 3, propuesta por el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993).

Tabla 3. Clasificación de los poros del suelo, según su tamaño. Tomado de (SSDS, 1993).

TIPO DE POROS	DIÁMETRO ( mm )
Muy gruesos	> 10
Gruesos	10 – 5
Medios	5 – 2
Finos	2 – 0.5
Muy finos	< 0.5



La porosidad debido a que el suelo depende de las características de su fracción sólida, ella se estima con base en las densidades real y aparente, según la relación:

$$P = 1 - \left( \frac{D_a}{D_r} \right) * 100 \text{ Ecuación 2.}$$

Dónde

P= porosidad total: %

Da= densidad aparente: Mg.m<sup>-3</sup>

Dr= densidad real: Mg.m<sup>-3</sup>

### 4.3. PROPIEDADES QUÍMICAS ASOCIADAS A LA REGULACIÓN HÍDRICA DEL SUELO

#### 4.3.1. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (C.I.C.)

El intercambio iónico es un proceso reversible, estequiométrico y rápido mediante el cual la fase sólida retira y retiene algunos iones de la solución del suelo, al tiempo que le entrega cantidades equivalentes de otros, para establecer un nuevo equilibrio entre las 2 fases. Por tanto la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la medida de la capacidad que posee un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo. Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico, por las cantidades de ellos que participan en dichos procesos, son Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> (las bases del suelo) y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; en suelos ácidos, a partir de ciertos valores de pH, como se verá más adelante, el Al<sup>3+</sup> juega un papel muy importante en el complejo de intercambio catiónico del suelo constituyendo, junto con el H<sup>+</sup>, la acidez intercambiable del mismo(Jaramillo, 2002).

Es la capacidad que posee un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo, agua, metales pesados y moléculas orgánicas. Los cationes que son sometidos a esta retención quedan protegidos contra los procesos que tratan de evacuarlos del suelo, como la lixiviación, evitando así que se pierdan nutrientes para las plantas. Además, como la retención se hace superficialmente obedeciendo a diferencias de carga electrostática, los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por otros de la solución del suelo, convirtiéndose en cationes intercambiables, necesarios en los procesos de nutrición de la planta (Juárez et al., 2006).

Debido a que los coloides poseen principalmente carga negativa esta propiedad se debe tener en cuenta, a la hora de realizar un análisis de la capacidad de retención de humedad

del suelo, ya que las moléculas de agua al ser dipolares dada la configuración espacial de los átomos de oxígeno e hidrógeno que generan un polo negativo y uno positivo respectivamente presentan fuerzas de cohesión (atracción de las mismas moléculas de agua) y adhesión (atracción de las moléculas de agua y los coloides del suelo) (Juárez et al., 2006).

#### **4.3.2. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO**

Desde un punto de vista netamente práctico, pensando en la explotación sostenible del suelo, la materia orgánica puede considerarse como el principal componente sólido que posee este recurso natural, ya que de alguna manera se relaciona con casi todas las propiedades del mismo.

La materia orgánica del suelo es una mezcla de restos vegetales y animales y los productos de su descomposición, sustancias húmicas de síntesis y millones de organismos vivos: meso, microfauna y microorganismos, que, junto con las enzimas, son los responsables de los innumerables procesos bioquímicos y biológicos que ocurren en el suelo y, por lo tanto, de su funcionamiento. Tomado de (Porta *et al.*, 2011).

Por lo general en contenido de materia orgánica se encuentra en un intervalo que va desde 1%, en suelos de zonas secas, a más de 90 % en suelos orgánicos, Histosoles, pasando por valores del 3%, en suelos de regadío y un 8 % en suelos de praderas húmedas. (Porta *et al.*, 2011).

A continuación en la tabla 4 se muestra el efecto general de la materia orgánica de suelo que sobre algunas propiedades del suelo.

Tabla 4. Efecto general de la materia orgánica sobre algunas propiedades del suelo.

PROPIEDAD	EFFECTO AL AUMENTAR EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA
<u>Estructura</u>	Favorece su formación, aumenta el tamaño y estabilidad de los agregados.
<u>Porosidad</u>	Aumenta la cantidad de macroporos.
<u>Aireación</u>	Aumenta el volumen de aireación y mejora la circulación del aire.
<u>Infiltración</u>	Aumenta su velocidad.
<u>Drenaje</u>	Aumenta la velocidad de circulación del agua dentro del suelo.
<u>Humedad</u>	Aumenta la capacidad de retener agua, sobre todo a bajas tensiones y/o si el suelo es arenoso. En general, 1 g de carbono orgánico retiene 1.5 g de agua, a 15 bar y 3.5 g de agua, a 0.3 bar, aproximadamente, según el SSL (1995).
<u>Consistencia</u>	Aumenta la friabilidad, disminuye la pegajosidad, la plasticidad y el encostramiento superficial; con esto se facilita el laboreo del suelo ya que éste le opone menor resistencia a los implementos y a las máquinas; también en este sentido tiene efectos económicos al requerirse menos potencia y menos gasto de combustible.
<u>Erodabilidad</u>	Disminuye la susceptibilidad del suelo a la erosión.
<u>Color</u>	Oscurece el suelo facilitando su calentamiento, con lo cual mejora la germinación de las semillas, el desarrollo radicular y, en general, la nutrición de la planta.
<u>CIC</u>	Incrementa su valor. En términos generales, 1 g de carbono orgánico aporta entre 3 y 4 meq a la CIC (SSL, 1995).
<u>Capacidad buffer</u>	Aumenta.
<u>pH</u>	Disminuye.
<u>Nutrientes</u>	Aporta algunos (N, P, S principalmente) durante el proceso de mineralización; puede ocasionar fijación de algunos elementos menores; la disponibilidad de algunos nutrientes se puede ver reducida debido a la formación de complejos estables en los cuales se ven involucrados, como es el caso de la formación de quelatos con Cu, Mn, Zn, Fe, entre otros, o a procesos de adsorción selectiva de algunos iones.
<u>Contaminación</u>	La materia orgánica almacena compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o metales pesados (Pb, Ni, etc.), que llegan al suelo, dificultando su eliminación de este medio.
<u>Hidrofobicidad</u>	Los compuestos hidrofóbicos que se acumulan en el suelo son orgánicos; ellos alteran las propiedades hídricas del suelo que los posee.
<u>Biota</u>	La principal fuente de energía para los organismos que viven en el suelo es la materia orgánica del mismo; algunos productos de su alteración pueden ser tóxicos para algunos de ellos.

Tomado de (Juárez *et al.*, 2006)

#### 4.4. PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO

##### 4.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

La cantidad de agua que posea el suelo es una de sus características más específicas y está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración (Jaramillo, 2002).

Con respecto a la influencia que tiene el contenido de coloides (arcilla y humus) sobre el contenido de humedad del suelo, en la Figura 2 se observa que la cantidad de agua en él aumenta linealmente al aumentar su contenido de arcilla y/o de materia orgánica, conservándose constantes las fuerzas de retención..

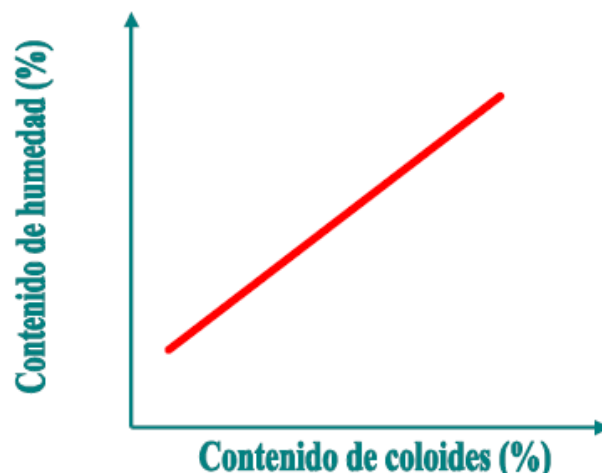


Figura 2. Relación teórica general entre el contenido de coloides y el contenido de humedad del suelo, a una fuerza de retención constante. Tomado de (Jaramillo, 2002).

González y García, 1987) encontraron diferencias notorias entre el contenido de humedad de arenas de diferentes suelos (Andisol y Mollisol), atribuyéndole la mayor acumulación obtenida en el Andisol a la presencia de características vesiculares en sus granos. Sánchez (1981) concluyó que los Andisoles retienen más agua a una misma tensión, que los Oxisoles, debido a que los agregados de alofano y materia orgánica son más porosos que los de caolinita y de óxidos de hierro; la Figura 3, ilustra el comportamiento descrito anteriormente.

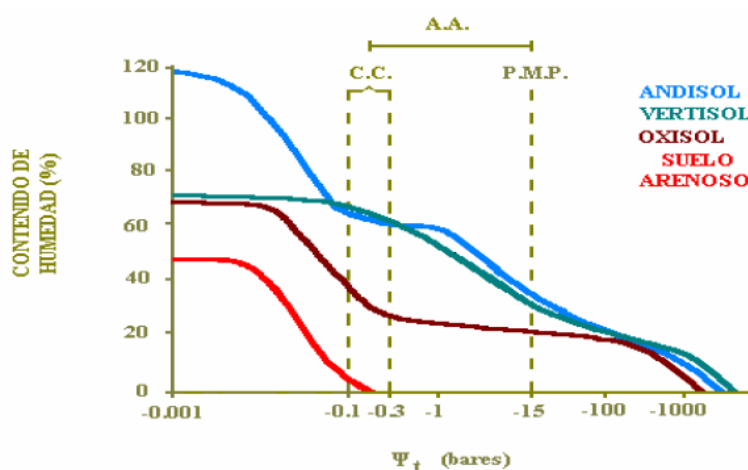


Figura 3. Efecto del tipo de arcilla del suelo, sobre su capacidad de retención de humedad (Contenido gravimétrico de humedad; A.A: Agua aprovechable; C.C.: Capacidad de campo; P.M.P.: Punto de marchitez permanente). (Adaptada y complementada de varios autores, citados por Sánchez, 1981) Tomado de (Sánchez, 1981).

#### 4.4.1.1. RETENCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

El agua del suelo se presenta adherida a las partículas sólidas de éste en forma de películas y no está libre en él, a no ser que se encuentre saturado; lo anterior implica que sobre el agua del suelo actúan una serie de fuerzas, de magnitud y dirección variadas, que definen el estado energético del agua del suelo en un determinado punto de él. (Jaramillo, 2002).

(Jury et al., 1991), indican que el agua del suelo está sometida a varias fuerzas, entre las que destacan la atracción vertical, hacia abajo, que ejercen el campo gravitacional de la tierra, el propio peso del agua y el peso de las partículas sólidas suspendidas en ella; el campo de fuerzas que generan, en todas direcciones, las superficies de los sólidos del suelo; las fuerzas que ejercen los iones disueltos en el agua, atrayéndola hacia ellos y las fuerzas de atracción entre moléculas de agua y el desbalance entre éstas y la interfase agua – aire.

El estado energético del agua del suelo depende, como el de cualquier cuerpo, de los dos tipos de energía: La energía cinética y la energía potencial. La energía cinética ( $E_c$ ) depende del movimiento del cuerpo considerado y es proporcional a su velocidad al cuadrado ( $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ : m: masa; v: velocidad). En el suelo, el movimiento del agua es muy lento, por lo que su energía cinética es despreciable (Hillel, 1998).

La energía potencial es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su posición en un campo de fuerzas (Jury et al., 1991). Esta energía, según (Hillel, 1998), es la que tiene especial importancia en la determinación del estado y del movimiento del agua en el suelo. Como no hay un valor absoluto de energía, para poder definir el estado energético del agua del suelo es indispensable definir una condición o estado de referencia con el cual poder comparar.

El estado de referencia o estado estándar para la energía potencial del agua del suelo, lo definen Jury et al., (1991), como “el estado del agua pura (sin solutos) y libre (sin otras fuerzas diferentes a la gravedad actuando sobre ella), sometida a una presión de referencia  $P_o$  (la atmosférica), a una temperatura de referencia  $T_o$  y a una elevación de referencia  $Z_o$ ”. Al agua que se encuentra en el estado anterior se le ha asignado, arbitrariamente, un valor de energía potencial de cero (Jury et al., 1991)

La energía potencial del agua del suelo se define, entonces, como la “diferencia en energía por cantidad unitaria de agua, comparada con el estado estándar” (Jury et al., 1991). Esta diferencia en energía potencial entre dos puntos, más comúnmente llamada potencial total del agua del suelo, en sistemas isotérmicos, determina:

- ✓ La dirección del flujo del agua, y
- ✓ La cantidad de trabajo disponible para causar flujo, o
- ✓ La cantidad de trabajo que debe hacerse desde afuera, para generar flujo.

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, citada por (Hillel ,1998), define el potencial total del agua del suelo como “la cantidad de trabajo que se debe hacer por cantidad unitaria de agua pura para transportar, de forma reversible e isotérmica, una cantidad infinitesimal de agua, desde un depósito de agua pura hasta el agua del suelo a una elevación especificada, a presión atmosférica”. Este potencial tiene varios componentes los cuales se definen en los siguientes numerales mostrados en la figura 4 y que se expresan, según (Jury *et al.*, 1991), mediante la siguiente relación:

$$\psi_t = \psi_g + \psi_o + \psi_{tp} \quad \text{Ecuación 3. Tomado de (Jaramillo, 2002)}$$

Donde:

$(\psi_t)$ = potencial total.

$(\psi_g)$ = potencial gravitacional.

$(\psi_o)$ = potencial osmótico.

$(\psi_{tp})$ = potencial de presión tensiométrica.

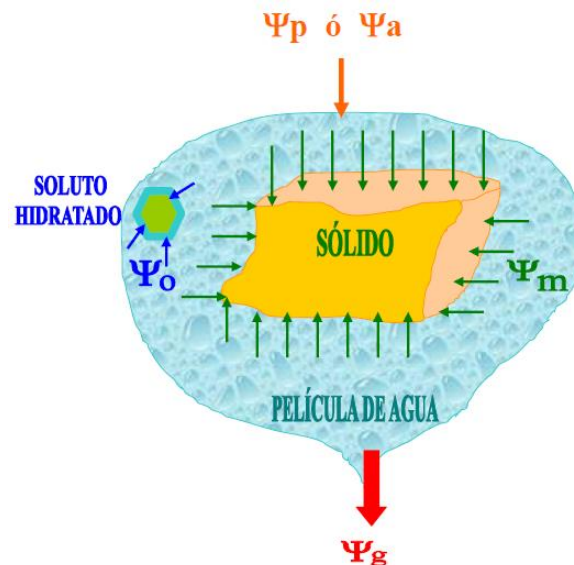


Figura 4. Representación esquemática de los potenciales componentes del potencial total del agua del suelo, en un suelo no expansivo. Tomado de (Jaramillo, 2002).

#### 4.4.1.2. LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

También es conocida como curva característica de humedad del suelo. Es una gráfica que representa la relación existente entre el potencial total del agua del suelo y el contenido de humedad del mismo, en un amplio rango de tensiones. Esta relación tiene una dependencia muy grande de la textura del suelo, como puede verse en las gráficas teóricas que se presentan en la Figura 5. Es una herramienta indispensable en el manejo de riegos y sirve para establecer controles en el campo, utilizando, generalmente, los tensiómetros.

Tabla 5. Comportamiento de la humedad del suelo con respecto a su contenido de materiales coloidales. (Resultados tomados de IGAC, 1977).

SUELO	HORIZON- TE	ESPESOR ( cm )	CONTENIDO ( % ) DE*		CONTENIDO GRAVMÉTRICO DE HUMEDAD ( % )**		
			Ar	M.O.	C.C.	P.M.P.	A.A.
<u>Andisol</u>	Ap	0 - 20	14	10.58	63.3	34.6	28.7
	Bs	55 - 76	10	3.10	34.6	17.4	17.2
<u>Alfisol</u>	E	0 - 22	14	1.74	32.6	8.8	23.8
	Bt	32 - 60	19	0.81	31.4	16.6	14.8
<u>Inceptisol</u>	Ah	0 - 28	14	13.72	55.1	30.5	24.6
	Bs	37 - 58	14	3.36	43.9	27.4	16.5

\* Ar: Arcilla. M.O.: Materia orgánica.

\*\* C.C.: Capacidad de campo. P.M.P.: Punto de marchitez permanente. A.A.: Agua aprovechable.

Tomado de (IGAC, 1977).

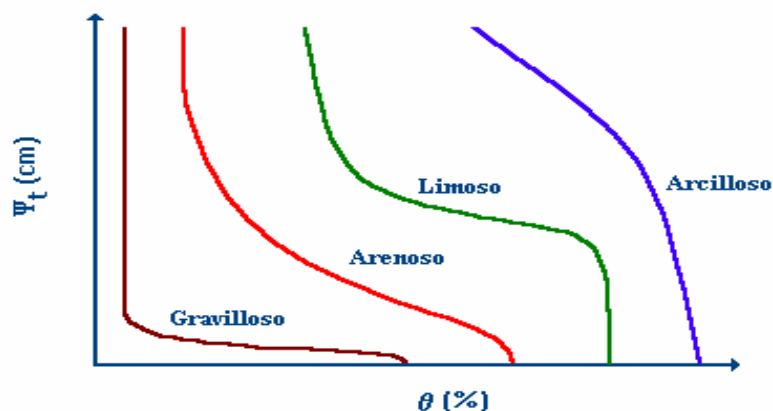


Figura 5. Efecto teórico de la textura sobre el comportamiento de la curva de retención de humedad del suelo (Generalizada de Stephens, 1996) Tomado de (Stephens, 1996).

#### 4.4.2. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

Cuando el agua del suelo está en equilibrio, el potencial total en el sistema es constante y, por lo tanto, no hay ningún movimiento de ella en el suelo. El movimiento de agua en el suelo se da cuando las condiciones de equilibrio se rompen y se generan diferencias de potencial entre los diferentes puntos del sistema. Cuando se presenta flujo de agua en el suelo, el agua se desplaza obedeciendo a gradientes de potencial total en el mismo: Ella se desplaza desde donde está retenida con un potencial menos negativo (mayor potencial) hacia donde se presenta un potencial más negativo (menor potencial); cuando el  $\psi_t$  en los diferentes puntos del suelo se iguala en todos ellos, se suspende el movimiento de agua (Jaramillo, 2002).

El movimiento del agua en “suelos saturados” es solo un caso particular de la dinámica del agua en este medio poroso. Lo más recurrente en la naturaleza, asociada a la producción agrícola, es la condición del suelo “no saturado”. La condición de movimiento en suelo saturado es descrita a través de la conocida Ley de Darcy (Henry Darcy: ingeniero hidráulico Francés), quien publicó sus experiencias en 1836. (Tafur, 2014b)

La condición de movimiento en suelo no saturado fue descrita por primera vez por el físico estadounidense Edgar Buckingham en 1907, quién basado en los trabajos de Darcy, extendió la conocida ley a la condición de suelo no saturado. Sin embargo, a pesar de este trascendental aporte, aún hoy se le sigue llamando ley de Darcy al modelo que representa la dinámica del agua en medio saturado como en el no saturado, cuando en justicia debería llamársele Ley de Darcy-Buckingham. El modelo es representado en la ecuación 4.

$$v = q = -k(\theta)i \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde

$v = q$  = Densidad o velocidad de flujo, (L / T);

$k(\theta)$  = Conductividad hidráulica o función de conductividad hidráulica, también conocido como coeficiente de permeabilidad, (L / T);

$i$  = Gradiente hidráulico, adimensional. (Tafur, 2014b)

Aquí la conductividad hidráulica es función de la humedad del suelo, es decir, que depende del contenido de humedad ( $\theta$ ). Esto significa que cuando el suelo esté saturado tendría el máximo valor de conductividad hidráulica (conductividad hidráulica saturada), mientras que en la medida que el suelo pierda humedad, la conductividad disminuirá a valores inferiores y este descenso no se produce necesariamente de forma lineal.



Es de gran importancia en el estudio de la erosión del suelo ya que investigaciones centradas en el horizonte superficial, la capacidad de agua disponible dentro de los primeros horizontes de un suelo erosionado es probablemente una de las propiedades más afectadas; Gollany *et al.*, (1992), en un estudio donde se removieron 30 y 45 cm de suelo superficial, midieron una capacidad de agua disponible de 187, 166 y 132 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente; los investigadores mencionan que este resultado se debió al efecto aditivo del bajo contenido de materia orgánica, el deterioro de la estructura de suelo superficial y la reducción de la porosidad total, concordando en sus conclusiones con otros autores (Mbagwu *et al.*, 1984, Dregne, 1992, Jagadamma *et al.*, 2009, Brunel y Seguel, 2011).

#### 4.4.2.1. INFILTRACIÓN

Es la propiedad que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo. Es un parámetro crítico cuando se están haciendo diseños de riego, pues ella define cuánto tiempo debe permanecer el agua sobre la superficie del suelo para que haya un adecuado humedecimiento, si se trata de riego superficial, o limita los caudales de aplicación en sistemas de aspersión (Jaramillo, 2002).

La velocidad de infiltración es función de muchas variables del suelo, entre las cuales cabe destacarse: la textura, el contenido de humedad del suelo, el grado de agrietamiento, la presencia de capas impermeables o porosas y la compactación superficial producto de las labores de cultivo (CECIL, 1998). Tomado de (Cely, 2010).

##### ➤ FACTORES QUE AFECTAN LA INFILTRACIÓN

- La velocidad con la cual pasa el agua del exterior al interior del suelo depende de varios factores como:
- El contenido de humedad que presente el suelo al momento de hacer la evaluación: A mayor contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.
- La permeabilidad del suelo: La calidad del arreglo físico del suelo facilita o dificulta el movimiento de agua dentro de él, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad con la cual el suelo puede recibir nuevas cantidades de agua.
- La cantidad y tipo de coloides: Si en el suelo hay contenidos considerables de coloides expansibles, a medida que el suelo se va humedeciendo se va reduciendo el tamaño de los poros, aumentando la fricción del agua en ellos y por tanto aumentando la dificultad para su movimiento, lo cual reduce, a su vez, la infiltración.

- El tipo de poros: Si en el suelo predominan los poros finos, la infiltración será baja; éste tipo de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como con problemas de compactación.
- La homogeneidad del perfil del suelo: En suelos de perfil homogéneo se presenta una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración; cuando hay contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, éstos pueden generar interrupciones en los poros, o reducciones drásticas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.
- Las condiciones superficiales del suelo: La presencia de sellamiento y/o encostramiento superficial del suelo reduce su infiltración.
- La presencia de materiales hidrofóbicos en el suelo: La velocidad de infiltración se ve menguada en la medida en que se presenten en el suelo, materiales repelentes al agua.
- El tiempo que dure el suministro de agua al suelo, sea por riego o por lluvia (Ritsema *et al.*, 1996).

#### 4.4.2.2. LA PERMEABILIDAD

Con frecuencia se presenta confusión alrededor del término permeabilidad y conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. Al respecto conviene comentar lo siguiente: el término permeabilidad y más específicamente, permeabilidad intrínseca fue introducido por la Soil Science Society of America en 1952, buscando establecer un concepto más “constante” en relación a la facilidad o dificultad con que el agua se mueve dentro del suelo, pero que dependiera fundamentalmente del medio poroso y no del fluido (agua). De esta forma el concepto solo hace referencia al suelo y sus dimensiones son de superficie (L<sup>2</sup>), por ejemplo cm<sup>2</sup>. De manera general se acepta que la permeabilidad intrínseca es una constante y de esta forma, que los suelos livianos poseen mayor permeabilidad intrínseca que los pesados. También se establece que la conductividad hidráulica si depende tanto del medio poroso (el suelo), como del fluido (el agua). Los dos conceptos se relacionan mediante la expresión 5. (Tafur, 2014b).

$$k(\theta) = \frac{k^* \rho g}{\mu} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde

$k^*$  = Permeabilidad intrínseca, (L<sup>2</sup>).

$g$  = Aceleración de la gravedad, (L / T<sup>2</sup>).

$\rho$  = Densidad del agua; (M / L<sup>3</sup>).

$\mu$  = viscosidad dinámica, (M / T\*L)

## ➤ CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo; la propiedad que se mide para evaluar dicha posibilidad se conoce como CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO y se representa como  $K_s$  o simplemente  $K$ ; por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo. (Jaramillo, 2002).

La Conductividad Hidráulica del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente (Hanks y Ashcroft, 1980). Cuando se hace referencia a la función de conductividad hidráulica, es porque se acepta que esta varía conforme lo hace la humedad del suelo; es decir, si el suelo está saturado la conductividad expresará su máximo valor; pero si ese mismo suelo comienza a perder humedad, la conductividad disminuye de manera significativa, hasta acercarse a cero. En la literatura se encuentra con frecuencia un gráfico como el de la figura 6. En este gráfico se presentan dos curvas: una curva representa el comportamiento de la conductividad hidráulica de un suelo liviano (arenoso) y la otra la de un suelo pesado (arcilloso), con relación a la humedad. También se puede encontrar el mismo gráfico, pero variando con relación a la succión del agua del suelo o potencial mátrico. (Tafur, 2014b)

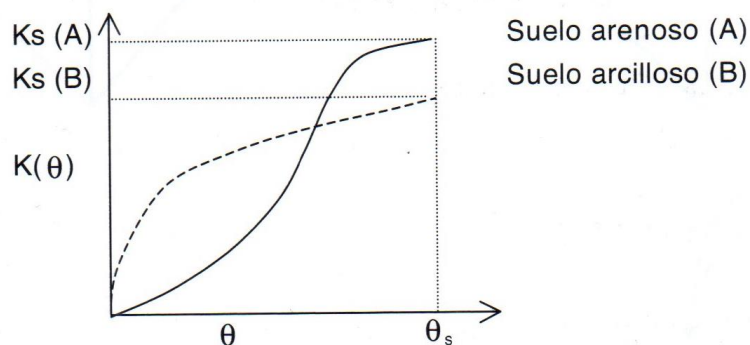


Figura 6. Representación de la conductividad hidráulica frente a la humedad de dos tipos de suelo. Tomado de (Porta *et al.*, 2011)

#### 4.5. TENDENCIAS SOBRE LA MODELACIÓN EN SUELOS AGRICOLAS

Existen diversos modelos que permiten predecir el movimiento del agua y los nutrientes en y a través de la zona no-saturada del suelo. Estos modelos numéricos necesitan de la estimación de numerosos parámetros. Esto es particularmente cierto cuando se analiza las propiedades hidráulicas de los suelos no-saturados, propiedades que dependen de la velocidad a la cual el agua y los químicos disueltos se mueven dentro del suelo.

En las últimas décadas, se han desarrollado numerosos métodos para determinar las propiedades hídricas de los suelos en el campo y en el laboratorio (Rubio y Llorens, 2003) aunque la mayoría de ellos son costosos y difíciles de implementar. Las mediciones in situ de la conductividad hidráulica del suelo son actualmente difíciles y muy lentas. Así, es necesario utilizar métodos más expeditivos y rápidos para determinar las propiedades de los suelos no-saturados (USDA, 2012).

Entre los programas más conocidos que permiten modelar flujo en medios porosos se encuentran:

**HYDRUS (1998):** El programa HYDRUS es un modelo de elementos finitos para simular el movimiento unidimensional de agua, el calor, y múltiples solutos en los medios de comunicación de forma variable saturado. El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo del agua saturada e insaturado y ecuaciones de dispersión y advección para el transporte de calor y de solutos.

La ecuación de flujo incorpora el término sumidero para tener en cuenta la absorción de agua por parte de raíces de las plantas. La ecuación de transporte de calor considera la conducción, así como la convección del agua que fluye.

Las ecuaciones de transporte de solutos tienen en cuenta el transporte por convección-dispersiva en la fase líquida, y la difusión en la fase gaseosa.

Las ecuaciones de transporte también incluyen disposiciones para:

- Reacciones no lineales y / o no equilibrio entre las fases sólida y líquida.
- Reacciones de equilibrio lineal entre las fases líquida y gaseosa.
- Producción de orden Cero, y dos Primeras reacciones de degradación orden: Uno que es independiente de otros solutos, y uno que proporciona el acoplamiento entre solutos que intervienen en las reacciones de primer orden.

El programa puede ser utilizado para analizar el agua y el soluto movimiento en medios porosos insaturados, parcialmente saturados, totalmente saturados. (USDA, 2005)

**RETC (1991):** Es un programa informático que puede ser utilizado para el análisis de la retención de agua en el suelo y las funciones de conductividad hidráulica de suelos insaturados. Estas propiedades hidráulicas son parámetros clave en cualquier descripción cuantitativa a través del flujo de agua en de la zona no saturada de los suelos. El programa utiliza los modelos paramétricos de Brooks – Corey (Brooks y Corey, 1964) y van Genuchten para representar la curva de retención de agua del suelo, y los modelos teóricos de distribución de tamaño del poro de (Mualem, 1976) y (Burdine, 1953) para predecir la función de la conductividad hidráulica no saturada de los datos de retención de agua del suelo observado.

El programa viene con un manual que da una explicación detallada de las diferentes expresiones del análisis utilizado para cuantificar la retención de agua del suelo y las funciones de conductividad hidráulica. De igual forma también se da una breve revisión sobre el método de optimización no lineal de mínimos cuadrados parámetro utilizado para la estimación de los coeficientes desconocidos en los modelos hidráulicos. El programa RETC puede ser usado para predecir la conductividad hidráulica a partir de datos de retención de agua del suelo observados suponiendo un valor de conductividad observado (no necesariamente en saturación). El programa también le permite adaptarse a las funciones analíticas de forma simultánea a la retención de agua observada y los datos de conductividad hidráulica (Van Genuchten *et al.*, 1991).

**ROSETTA NRCS (2001):** es un programa desarrollado por el Laboratorio de Salinidad del USDAARS en Riverside, California, que implementa funciones de pedotransferencia (PTF) basados en redes neuronales artificiales que a partir de la textura del suelo, densidad aparente y uno o dos puntos de retención de agua permite estimar las propiedades siguientes:

- Los parámetros de retención de agua de acuerdo con Van Genuchten (1980)
- La conductividad hidráulica saturada
- Parámetros de conductividad hidráulica insaturada según Van Genuchten (1980) y Mualem (1976). ( Schaap , 2001)

**CHAIN-2D (1984):** Es un programa informático para simular el flujo de dos dimensiones de forma variable el agua, el transporte de calor, y el movimiento de solutos que participan en las reacciones de descomposición de primer orden secuencial. El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo del agua saturado-insaturado y la ecuación de convección-dispersión de calor y el transporte de solutos. La ecuación de flujo incorpora un término sumidero para tener en cuenta la absorción de agua por las raíces de

las plantas. La parte de flujo de agua del modelo puede tratar con la cabeza de agua prescrita, el gradiente, y los límites de flujo, así como límites controlados por las condiciones atmosféricas. También se incluye libre condición de contorno de drenaje y una representación simplificada de desagües nodales utilizando resultados de los experimentos analógicos eléctricos. La ecuación de transporte de calor considera transporte debido a la conducción y la convección con el agua que fluye. Las ecuaciones de transporte de solutos consideran esta forma convectiva la dispersión en la fase líquida, así como la difusión en la fase gaseosa.

Las ecuaciones de flujo y transporte que rigen son resueltos numéricamente utilizando esquemas de elementos finitos lineales de tipo Galerkin. Dependiendo del tamaño del problema, las ecuaciones de matriz resultantes de la discretización de las ecuaciones de gobierno se resuelven usando ya sea la eliminación gaussiana para matrices en bandas o el método del gradiente conjugado para matrices simétricas, o el método de ORTHOMIN para matrices asimétricas. El programa está escrito en FORTRAN ANSI estándar 77 (Simunek y van Genuchten, 1994)

**SOILCO2 (1994):** Es un modelo de simulación predictiva, basado en relaciones orientadas a procesos. El modelo incluye el flujo de agua unidimensional y el transporte de múltiples fases de CO<sub>2</sub> utilizando la ecuación de Richards y las ecuaciones de convección-dispersión, respectivamente, así como el flujo de calor y CO<sub>2</sub> en el modelo de producción. La ecuación de flujo incorpora un término sumidero para tener en cuenta la absorción de agua por las raíces de las plantas. En el modelo se considera que el transporte de CO<sub>2</sub> en la zona no saturada puede ocurrir tanto en la fase líquida como en la gaseosa. La ecuación de transporte gaseoso da cuenta de la producción de CO<sub>2</sub> y la absorción de CO<sub>2</sub> por las plantas raíces asociados con la absorción de agua de la raíz. El modelo de producción de CO<sub>2</sub> considera tanto la actividad microbiana y la respiración de las raíces, las cuales dependen del contenido de agua, características de la temperatura, de crecimiento, de salinidad, y de la planta y del suelo. El programa está escrito en FORTRAN ANSI estándar 77 (Simunek y Suárez, 1994)

**STANMOD-Estudio de modelos de análisis (1997):** Es un paquete de software basado en Windows para evaluar el transporte de solutos en medios porosos utilizando soluciones analíticas de la ecuación de transporte de solutos convección-dispersión. La versión 1.0 de STANMOD incluye los siguientes modelos para los problemas de transporte de una sola dimensión:

- CXTFIT 2,0
- CFITM
- CFITM
- CADENA

La versión 2.0 de STANMOD también incluye los siguientes modelos para los problemas de transporte de dos y tres dimensiones:

- 3DADE
- N3DADE. (Simunek et al., 1997)

**MOC3D (2004):** Este modelo simula el transporte de solutos en tres dimensiones que fluyen en aguas subterráneas. El modelo calcula los cambios en el tiempo de la concentración de un constituyente químico disuelto solo que son causadas debido al transporte advectivo, dispersión hidrodinámica (incluyendo tanto dispersión mecánica y difusión), la mezcla (o dilución) de fuentes de fluido, y reacciones químicas matemáticamente simples (incluyendo la sorción lineal, que está representado por un retraso y decadencia de factores,). El modelo también puede simular el transporte de las aguas subterráneas, el tiempo, los efectos de la doble porosidad y de orden de crecimiento - pérdida. MOC3D está escrito en Fortran 77 con la siguiente extensión: el uso de nombres de las variables de más de 6 caracteres (Goode, 1999), (USGS, 2004).

**UNSODA (1996):** Es una base de datos de las propiedades hidráulicas del suelo no saturado donde se puede evidenciar información sobre la retención de agua, la conductividad hidráulica y el movimiento del agua del suelo, propiedades básicas de suelo (distribución de tamaño de partícula, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etc., información adicional acerca de la tierra y los procedimientos experimentales; y puede ser utilizada para el almacenamiento y edición de datos, búsqueda de conjuntos de datos basados en las especificaciones de consulta definidos por el usuario y escritura de los contenidos de los conjuntos de datos seleccionados a un dispositivo de salida.

Los modelos matemáticos se han convertido cada vez más populares en la investigación y gestión de los procesos de flujo y transporte en el medio subterráneo. Debido a las mejoras en el software y equipos informáticos, la utilidad de los modelos numéricos depende cada vez más de la disponibilidad de los parámetros de la entrada exactos. Las funciones hidráulicas insaturadas son los datos de entrada clave en los modelos numéricos de los procesos de zona no saturada. Estas funciones pueden medirse directamente, estimaron indirectamente a través de predicción a partir de medir más fácilmente los datos en base a los modelos cuasi - empíricos o aproximan utilizando datos hidráulicos de suelos similares (USDA, 2012).

Hay numerosos programas para el cálculo de infiltración en medios porosos saturados o no saturados. Estos programas permiten resolver el problema para casos particulares, en

general medios semi-infinitos, debido a que la ecuación de Richards es no lineal y no existen soluciones cerradas.

Todos estos programas necesitan la definición de las propiedades hidráulicas de los suelos y en muchos casos necesitan los parámetros de las funciones hidráulicas para los distintos modelos.

## 5. MÉTODOS Y MATERIALES

Para el análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo se tendrá en cuenta la modelación mediante herramientas computacionales, las cuales son una herramienta actual que brinda en muchas ocasiones, información de gran relevancia en el desarrollo de proyectos de investigación en suelos y áreas afines.

Para este caso en particular se busca mediante la implementación de estas herramientas, la modelación de las propiedades hidrofísicas del suelo en la Parcela Experimental de la Universidad del Valle en el Laboratorio de Suelos y Agua (L.A.S.A.), sede Meléndez, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Cali a  $3^{\circ} 32'22''$  N y  $76^{\circ} 31'57''$  W, a 976 metros sobre el nivel del mar. La temperatura media anual es  $28^{\circ}\text{C}$  y la precipitación media anual es 900 mm. Para la realización del proyecto se destinó un área de  $1000\text{ m}^2$ .



Figura 7. Imagen satelital de la granja experimental de la Universidad del Valle. Obtenida a través del software Google Earth (2014).





Figura 8. Ubicación geográfica parcela experimental del laboratorio de suelos y aguas LASA
   
 de la Universidad del Valle, 2015.

## 5.2. DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO EN LA PARCELA EXPERIMENTAL DE UNIVERSIDAD DEL VALLLE

### 5.2.1. MUESTREO DE SUELOS

Para determinar el número de muestras se utilizará un análisis estadístico a través de la
   
 aplicación de la ecuación 6, la cual hace parte de las técnicas de muestreo estadístico
   
 correspondiente al Muestreo Aleatorio Simple donde se selecciona una muestra de tamaño
   
 n de una población de N unidades, cada elemento de la población debe tener la misma
   
 probabilidad de ser seleccionada en la muestra.

$$n_0 = \frac{z^2 s^2}{\epsilon^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$n_{final} = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} ; \text{ si y solo si } \frac{n}{N} > 0,05 \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde

$Z$  = Nivel de confiabilidad (90%, 95%, 98%)

$\varepsilon$  = Error de muestreo (máximo del 15%)

$S^2$  = Varianza obtenida de una muestra piloto.

Donde el error de muestreo es definido a partir de la ecuación 7

$$-\varepsilon = \frac{ts}{\sqrt{n}} \text{ Ecuación 8}$$

Donde  $t$  es la distribución de Student. (Kuehl, 2001).

Para el inicio del análisis de laboratorio se tomarán en cuenta del área de estudio una cuadrilla de muestreo que permite a través del estudio estadístico la toma de 40 puntos de muestreo esquematizadas de la siguiente manera:



Figura 9. Esquema de distribución de muestras en el área de la parcela experimental de la Universidad del Valle. Tomado de (Google Earth, 2014).

Donde el rectángulo subrayado con rojo representa el área de estudio y dentro las posibles muestras de suelo a las que se les realizarán las pruebas concernientes a las propiedades hidrofísicas.

A continuación en la tabla 6 se describen los métodos que se utilizarán en la determinación de las propiedades asociadas a la regulación hídrica del suelo a partir de número de muestras a realizar.

Tabla 6. Métodos a utilizar en la determinación de las propiedades asociadas a la regulación hídrica para un total 40 muestras representativas.

VARIABLES	MÉTODOS	PROFUNDIDAD DE EVALUACIÓN(cm)	# DE MUESTRAS EXPERIMENTALES
TEXTURA	HIDROMETRO O BOUYUCOS. (Forsythe, 1975)	0-20	5
DENSIDAD APARENTE	METODOLOGIA DE LA DENSIDAD APARENTE EN HUMEDO $D_a = (D_a H) / (1 + W)$ (Tafur, 2014a)	0-10	5
ESTABILIDAD DE AGRAGADOS	YODER. (Yoder, 1936)	0-20	3
		20-30	3
POROSIDAD	MESA DE TENSION. (Bezerra de Oliveira, 1968)	0-10	3
		10-20	3
CIC TOTAL	ACETATO DE AMONIO	0-20	3
CARBONO ORGANICO	WACKLEY-BLACK POR TITULACION. (Walkley y Black, 1934)	0-20	3
INFILTRACION	ANILLOS INFILTROMETROS (Hartmann, 2000)	0-20	5
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	POZO INVERTIDO (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds <i>et al.</i> , 2002) - SOFTWARE HYDRUS -2D (Simunek <i>et al.</i> , 1998)	0-30	5
RETENCION DE HUMEDAD	SOFTWARE HYDRUS -2D (Simunek <i>et al.</i> , 1998)	0-30	1 (arroja 5 curvas de acuerdo a la análisis de la conductividad hidráulica)

### CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

Para establecer la curva, en el laboratorio, las muestras de suelos se someten a diferentes presiones (0.1, 0.3, 1, 5, 10 y 15 atm, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se determina el contenido de humedad que presenta la muestra por el método gravimétrico, según la ecuación [4], registrando los resultados.

$$W(\%) = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 \quad \text{Ecuación 9. (Jaramillo, 2002).}$$

La ecuación [4] se transforma el contenido gravimétrico a volumétrico. Las tensiones se aplican a las muestras en ollas y platos de presión (ver Figura 5) y los resultados se grafican en papel semilogarítmico, colocando, en la escala logarítmica, la tensión y en la aritmética, el % de humedad, como puede verse en la Tabla 5 (Jaramillo, 2002).

Teniendo definida la curva de retención de humedad de un suelo, puede establecerse el contenido de humedad que presenta éste en cualquier momento, al medir en el campo la tensión con que esa agua está retenida.

$$\theta(\%) = \frac{W(\%)*\rho_w}{\rho_w} \quad \text{Ecuación 10. (Jaramillo, 2002).}$$

Donde  $\rho_w$  = densidad del agua.

El estudio en este caso tiene en cuenta que los análisis se realizaran en los primeros 30 centímetros del suelo, es decir, en el primer horizonte del suelo teniendo en cuenta que existe un consenso universal sobre la importancia de los primeros horizontes dentro de un perfil, ya que estos presentan la principal reserva y disponibilidad de nutrientes, materia orgánica y organismos del suelo, (Izaurrealde *et al.*, 2006).

### 5.3. APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EN LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO.

La simulación se realizó durante el año 2015 en la Universidad de la Valle, Cali Colombia) en el Laboratorio de Suelos y Aguas L.A.S.A. Para el desarrollo de este proyecto se utilizara la herramienta computacional (software) implementado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S.D.A.), llamado HYDRUS -2D el cual es descrito a continuación:

### 5.3.1. HYDRUS -2D

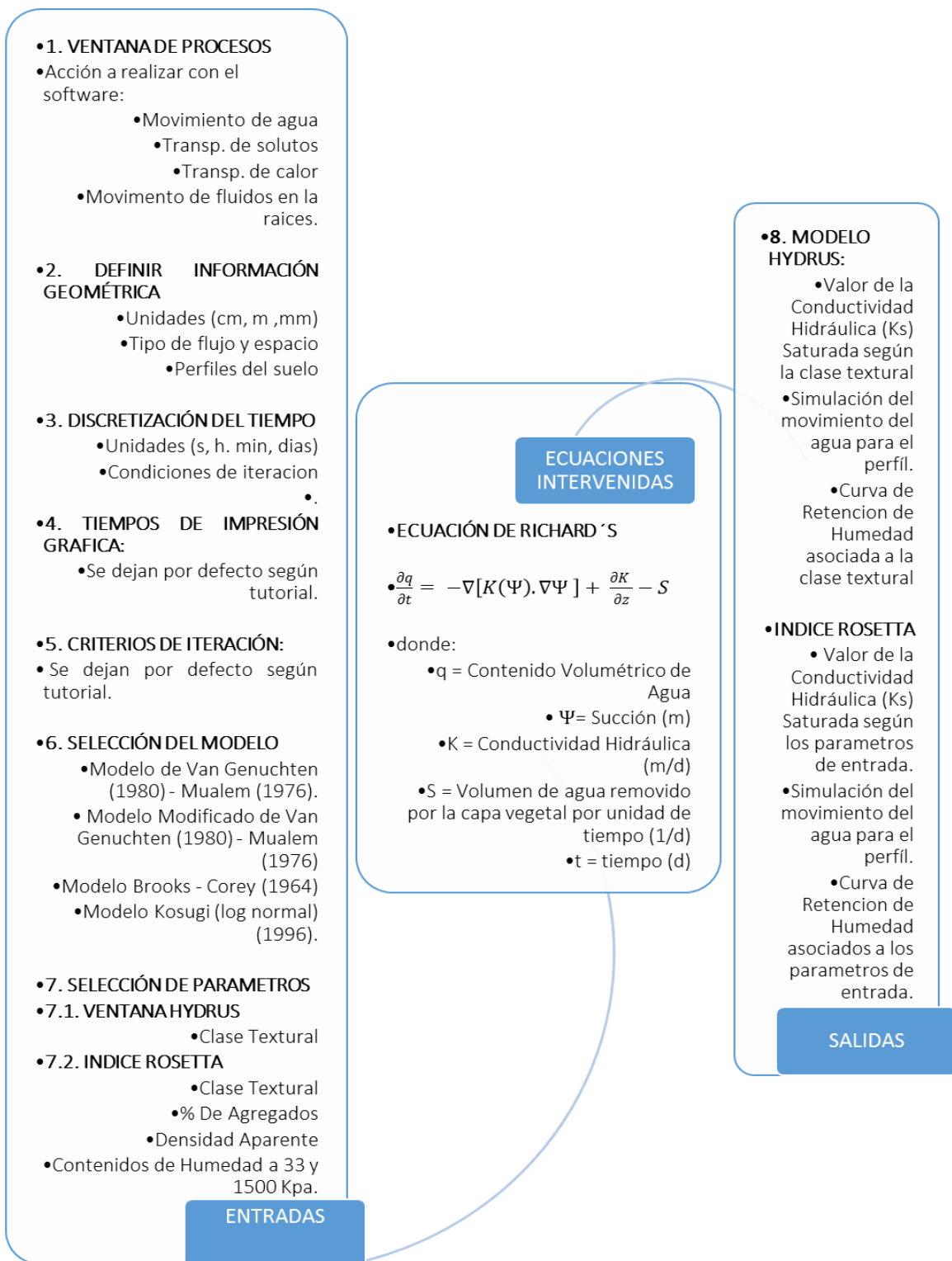


Figura 9. Metodología de utilización del software Hydrus -2D.

### 5.3.1.1. ASPECTOS TÉCNICOS DEL MODELO HYDRUS-2D

La forma en 2-D de la ecuación de Richard's, utilizada por HYDRUS 2-D para calcular el flujo en el medio poroso parcialmente saturado puede ser vista en la ecuación (9).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\nabla[K(\Psi) \cdot \nabla \Psi] + \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

$q$  = Contenido Volumétrico de Agua

$\Psi$  = Succión (m)

$K$  = Conductividad Hidráulica (m/d)

$S$  = Volumen de agua removido por la capa vegetal por unidad de tiempo (1/d)

$t$  = tiempo (d)

Para resolver la ecuación de Richard's es necesario conocer la curva de humedad característica del suelo, la cual puede ser obtenida de diversos modelos que simulan el comportamiento no saturado de ellos. HYDRUS 2-D describe las propiedades hidráulicas no saturadas del suelo mediante los modelos de van Genuchten (1980), Brooks y Corey (1964) el modelo de van Genuchten modificado y el modelo de Kosugi (1996). A su vez Hydrus- 2D incorpora el efecto de histéresis utilizando los modelos empíricos de Scott et al (1983) y Kool y Parker (1987) para este caso no se tendrá en cuenta. (Šimůnek, 2011).

Tabla 7. Descripción del Software Hydrus 2D y los componentes necesarios para la simulación de parámetros relacionados a la conductividad hidráulica y la curva de retención de humedad.

Modelo	Componentes	
Modelo de Van Genuchten (1980) - Mualem (1976)	Simulación directa con Hydrus 2D	Clase Textural
	Simulación con (Indicador Rosetta Redes Neuronales)	Clase Textural
		Estabilidad de Agregados
		Densidad Aparente
Modelo Modificado de Van Genuchten (1980) - Mualem (1976)	Simulación directa con Hydrus 2D	Clase Textural
	Simulación con (Indicador Rosetta Redes Neuronales)	Clase Textural
		Estabilidad de Agregados
		Densidad Aparente
Modelo Brooks - Corey (1964)	Simulación directa con Hydrus 2D	Clase Textural
Modelo Kosugi (log normal) (1996)	Simulación directa con Hydrus 2D	Clase Textural

En su interfaz Hydrus 2D cuenta con un índice del software Rosetta (Schaap, 1999), el cual aplica una metodología del Soil Survey Manual (Rawls y Brakensiek, 1985), que se basa en triángulos de textura y densidad aparente del suelo para estimarla dando, además, los criterios para situar los suelos en grupos hidrológicos. El método se ha perfeccionado con el programa Rosetta versión 1.0 bajo Windows (Schaap, 1999), que calcula las funciones hidráulicas no saturadas a partir de datos sustitutos tales como textura, densidad aparente y contenido de humedad a determinadas tensiones. Rosetta estima parámetros de retención de agua de acuerdo con el modelo de van Genuchten (1980), conductividad hidráulica saturada y parámetros de conductividad hidráulica insaturada de acuerdo con los modelos de van Genuchten (1980) y Mualem (1976). Rosetta predice los parámetros de retención de agua y conductividad hidráulica insaturada, estima la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ . La función de retención del agua de van Genuchten (1980), está dada por la ecuación:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde  $\theta(h)$  representa la curva de de retención de humedad del agua definiendo el contenido de agua  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), en función del agua del suelo de la cabeza  $h$  (cm),  $\theta_r$  y  $\theta_s$

(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) son el contenido de agua residual y a saturación, respectivamente, mientras que  $\alpha \left( \frac{1}{cm} \right)$  y  $n$  son parámetros de la forma de curva. La ecuación se puede reescribir definiendo la saturación relativa  $S_e$ :

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{1/n-1} \quad \text{Ecuación 11.}$$

La ecuación se utiliza conjuntamente con el modelo de distribución de tamaño de poros (Mualem, 1976) para producir el modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980):

$$K(S_e) = K_0 S_e^L \left\{ 1 - [1 - S_e^{n(n-1)}]^{1-1/n} \right\}^2 \quad \text{Ecuación 12.}$$

En el cual  $K_0$  es el punto que coincide con la saturación (cm/día), similar pero no necesariamente igual a la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ . El parámetro  $L$  (–) es la conectividad tortuosa de poros empírica que se estima normalmente como 0.5 (Mualem, 1976).

Brooks y Corey (1964) presentan la ecuación que describe la curva de retención de agua en el suelo por:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_d}{h} \right)^n \quad \text{para } h \geq h_d$$

$$S_e = 1 \quad \text{para } h < h_d \quad \text{Ecuación 13.}$$

Dónde  $\theta$  es el contenido volumétrico del agua en el suelo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>),  $\theta_s$  es el contenido de agua en el suelo saturado (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>),  $\theta_r$  es el contenido de agua residual (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>),  $S_e$  es la saturación eficaz,  $h_d$  es la succión de entrada del aire (cm), y  $n$  es un parámetro que tiene en cuenta la distribución del tamaño de los poros.

El modelo La Distribución Lognormal (DLN) (Kosugi, 1996) es representada por el modelo

$$S_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln h}{\ln h_0} \right) / 2^{1/2} \sigma \quad \text{Ecuación 14.}$$



#### **5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS (ANÁLISIS DE DATOS)**

En esta etapa se busca definir los parámetros que relacionen los resultados arrojados en la determinación en laboratorio de las propiedades asociadas a la regulación hídrica y la simulación por medio del software HYDRUS-2D.

Para este proyecto se buscara realizar un Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D.) el cual es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. Para conseguir este objetivo el Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D.), en este caso proporciona métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos y determinar la correlación entre lo que indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas, en este caso el análisis realizado en el laboratorio de las propiedades hidrofísicas y las modeladas en las herramientas computacionales. Para esto se utilizó el paquete de office, Excel el cual brinda las herramientas necesarias para el Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D.).

Para el análisis estadístico de comparación de datos obtenidos mediante las pruebas realizadas en laboratorio, frente a las simuladas por el software HYDRUS-2D se realizara las siguientes pruebas estadísticas para definir si hubo diferencias significativas entre los dos procesos, para esto se utilizara el análisis estadístico Prueba F, el análisis t-Student, el análisis de Correlación Lineal entre variables de Pearson y análisis de regresión múltiple.

##### **5.4.1. PRUEBA F**

La comparación de la variabilidad de los datos en dos grupos independientes se hace mediante la prueba “F” que permite comparar dos varianzas (varianza es el cuadrado de la desviación estándar) obteniendo un coeficiente, mayor que uno resultante de dividir la varianza mayor entre la menor.

Si la probabilidad es  $p$  menor que 0.05 o en general, menor que el valor hipotético previsto, para el valor de  $F$  obtenido, se acepta generalmente que la diferencia entre las varianzas es significativa (lo que también se expresa diciendo que las varianzas son heterogéneas o heterocedásticas); si  $p$  mayor que 0.05, se dice que las varianzas son iguales (estadísticamente), homogéneas u homocedásticas. (UNAL, 2015)

## 5.4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE T-STUDENT

La distribución t-Student es un valioso auxiliar estadístico que se utiliza para medir probabilidades. Se usa principalmente, cuando se tiene pocos datos y sirve para expresar intervalos de confianza y comparar los resultados de diferentes experimentos. La cantidad  $t$  (también llamada  $t$  de Student) se define por la siguiente ecuación:

$$\pm t = (\bar{x} - \mu) \frac{\sqrt{n}}{s} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Dónde:  $\bar{x}$  es la media muestral,  $s$  es la desviación estándar muestral y  $n$  es el tamaño de la muestra. Los grados de libertad utilizados en esta prueba se corresponden al valor  $n - 1$ .

Los valores de  $t$  se calculan tomando el hecho de que en general  $\bar{x}$  no será la misma que  $\mu$ , para compensar el error que se introduce al utilizar  $s$  como estimado de  $\sigma$ .

La siguiente figura presenta la gráfica de varias distribuciones  $t$ . La apariencia general de la distribución  $t$  es similar a la de la distribución normal estándar: ambas son simétricas y unimodales, y el valor máximo de la ordenada se alcanza en la media  $\mu = 0$ . Sin embargo, la distribución  $t$  tiene colas más amplias que la normal; esto es, la probabilidad de las colas es mayor que en la distribución normal. A medida que el número de grados de libertad tiende a infinito, la forma límite de la distribución  $t$  es la distribución normal estándar (UNAL, 2015).

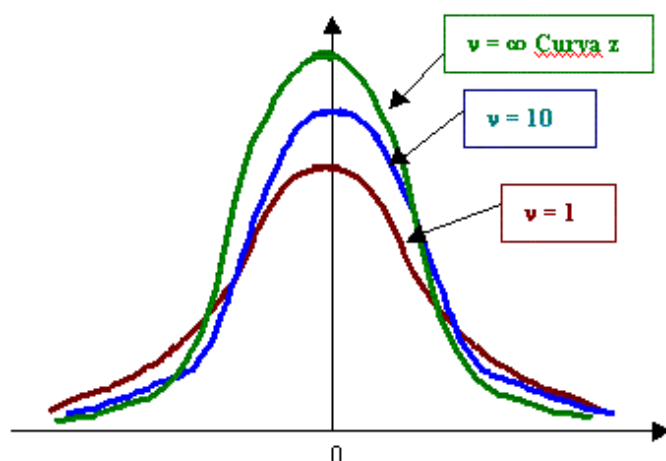


Figura 10. Distribución  $t$  de Student. (UNAL, 2015).

## Propiedades de las distribuciones

1. Cada curva  $t$  tiene forma de campana con centro en 0.
2. Cada curva  $t$ , está más dispersa que la curva normal estándar  $z$ .
3. A medida que  $\vartheta$  aumenta, la dispersión de la curva  $t$  correspondiente disminuye.
4. A medida que  $\vartheta \rightarrow \infty$  aumenta, la secuencia de curvas  $t$  se aproxima a la curva normal estándar, por lo que la curva  $z$  recibe a veces el nombre de curva  $t$  con  $gl = \infty$

Para determinar el supuesto de normalidad de los datos analizados, se trabaja con un nivel de significancia de  $p < 0,05$  (5%), es decir, para valores mayores o iguales este la hipótesis nula será rechazada estadísticamente, por lo tanto se cumple con el supuesto de normalidad. (UNAL, 2015)

### 5.4.3. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que se dice "variables relacionadas linealmente". Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson. Por ejemplo, la relación entre la ansiedad y el rendimiento tiene forma de U invertida; igualmente, si se relaciona población y tiempo la relación será de forma exponencial. En estos casos (y en otros muchos) no es conveniente utilizar la correlación de Pearson. Se insiste en este punto, que parece olvidarse con cierta frecuencia (Dagnino, 2014).

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Se dice, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tiene dos variables  $X$  e  $Y$ , y definiendo el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como  $r_{xy}$  entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1$$

Se ha especificado los términos "valores absolutos" ya que en realidad si se contempla el signo el coeficiente de correlación de Pearson oscila entre  $-1$  y  $+1$ . No obstante ha de indicarse que la magnitud de la relación vienen especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de  $+1$  como de  $-1$ . En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa. A continuación se pasa a desarrollar algo más estos conceptos (Dagnino, 2014).

Se dice que la correlación entre dos variables  $X$  e  $Y$  es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta.

Se dice que la relación es perfecta negativa cuando exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra. Igual que en el caso anterior esto sucede para relaciones funcionales exactas, propio de las ciencias físicas. (Dagnino, 2014).

### FÓRMULA UTILIZADA

El coeficiente de correlación de Pearson viene definido por la siguiente expresión:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Esto es, el coeficiente de correlación de Pearson hace referencia a la media de los productos cruzados de las puntuaciones estandarizadas de  $X$  y de  $Y$ . Esta fórmula reúne algunas propiedades que la hacen preferible a otras. A operar con puntuaciones estandarizadas es un índice libre de escala de medida. Por otro lado, su valor oscila, como ya se ha indicado, en términos absolutos, entre 0 y 1. (Dagnino, 2014).

#### 5.4.4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

El análisis de regresión múltiple es una técnica de análisis multivariable en el que se establece una relación funcional entre una variable dependiente o a explicar y una serie de variables independientes o explicativas, en la que se estiman los coeficientes de regresión que determinan el efecto que las variaciones de las variables independientes tienen sobre el comportamiento de la variable dependiente. (Requena, 2006)

El modelo más utilizado es el modelo lineal, pues es el que requiere estimar un menor número de parámetros (Bernal A. en Martínez, Martínez y Vacchiano, 2000). La medida de la bondad del ajuste de la función estimada viene dada por el coeficiente de correlación múltiple, y el coeficiente de determinación, que es el cuadrado del anterior, expresa la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por el modelo de regresión. El coeficiente de correlación parcial de cada variable explicativa, indica la relación específica de dicha variable con la variable dependiente, supuesto que permanecen constantes las demás variables independientes. (Requena, 2006)

En este tipo de análisis es frecuente la existencia de multicolinealidad, es decir, que las variables explicativas estén altamente correlacionadas entre sí, lo que perturba la interpretación de los coeficientes de regresión. El modelo de regresión requiere que todas

las variables, dependiente e independientes, estén medidas con escala métricas (Santesmases, 2001).

Para realizar los cálculos de Regresión Lineal, Coeficiente de Correlación de Pearson, Prueba F y Prueba de T- Student se utilizará el paquete software SPSS versión 19 para Windows, Minitab 17 y el paquete de Office Excel (2010) para los procesos de cálculos y determinación de estos parámetros.

## **5.5. REPRESENTACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO**

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por los factores de formación (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). Estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Jaramillo, 2011).

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso agropecuario, y aquellas propiedades que más se pueden ver afectadas por el manejo del suelo son las que presentan la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González *et al.*, 2000; Obando *et al.*; Jaramillo *et al.*, 2012).

Según (Cambardella *et al.*, 1994; Cambardella y Karlen, 1999; Amador *et al.*, 2000; Castrignanò *et al.*, 2000; Paz-González *et al.*, 2000; Mallarino *et al.*, 2001; Jaramillo, 2008a; Jaramillo *et al.*, 2008) el uso histórico del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. Diferencias en el manejo del agua, de los fertilizantes y de los abonos orgánicos, tanto en el tipo como en la forma de aplicarlos, generan diferencias en la variabilidad en las propiedades y los contenidos de nutrientes en el suelo. Los cambios en el laboreo también producen efectos similares.

La variabilidad de una propiedad depende de una gran cantidad de factores. Por ello, su interpretación debe estar basada en un amplio conocimiento tanto de la propiedad de interés como de los factores que la controlan. En la Tabla 8 se presentan los coeficientes de variación de algunas propiedades comunes del suelo, evaluadas con muestras tomadas bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo, pero con los mismos métodos de laboratorio. Obsérvese la gran cantidad de valores diferentes que puede tomar dicho coeficiente en la misma propiedad, dependiendo de las condiciones que represente el suelo e independientemente del número de muestras que se analicen. Los resultados expuestos

sugieren que la variabilidad es una característica intrínseca de cada propiedad y que su comportamiento es específico para cada condición ambiental, de suelo, de uso y de manejo.

Tabla 8. Coeficiente de variación (CV %) para algunas propiedades comunes del suelo, en el horizonte A, evaluadas con muestras tomadas bajo diferentes condiciones ambientales y de uso, en el departamento de Antioquia, calculados con base en datos de IGAC.

PROPIEDAD	REGIÓN		
	Urabá	Magdalena Medio	Bajo Cauca
Carbono Orgánico	50,56(280)*	122,64(33)	37,2(18)
Densidad Aparente	14,89(272)	15,29(29)	11,12(18)
CIC	31,74(280)	62,86(34)	52,25(18)
Bases Totales	42,76(280)	57,72(33)	98,67(18)
pH	13,01(280)	17,61(34)	19,88(18)
Agua Aprovechable	34,97(264)	70,16(29)	44,31(18)
Arcilla	37,72(280)	59,44(33)	34,9(18)

\*entre paréntesis cantidad de muestras utilizadas para el análisis.

El conocimiento de la dependencia espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere sobre él, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en ensayos de campo.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo de los suelos.

De las aplicaciones anteriores, la más utilizada es la de elaborar mapas de isolíneas que muestren la distribución espacial de alguna variable, mediante la técnica del Kriging, la cual es una técnica que permite hacer interpolaciones óptimas y no sesgadas de variables regionalizadas en sitios no muestreados, utilizando las propiedades estructurales de un semivariograma y un conjunto de datos iniciales (Jaramillo, 2012). Este método tiene la ventaja, sobre otros métodos de interpolación, de que a cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, lo que da una medida de la precisión con que se hace la interpolación. Este error también se puede cartografiar, pudiéndose establecer en qué lugares son más y en cuales menos fiables las estimaciones hechas (Webster y Oliver, 2007).

Se han diseñado varios métodos para hacer el Kriging cuya aplicación depende del tipo de datos de que se disponga (Goovaerts, 1998, 1999; Webster y Oliver, 2007; Hengl, 2009).

Para validar el uso de método de interpolación Kriging se utilizara El Error Medio Cuadrático (RMSE) el cual es la medida de la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los valores reales tomados del análisis experimental del espacio que se quiere modelar, a estas diferencias también se les conocen como residuos.( Ecuación 17 ) (Mair y Fares, 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{modelo,i})^2}{n}} \quad \text{Ecuación 17.}$$

Los criterios para seleccionar el mejor ajuste del método son: (i) valor de la media estandarizada próximo a cero, (ii) error RMSE más pequeño, (iii) error medio estándar cercano al RMSE y (iv) RMSE estandarizado cercano a la unidad. (Macías, 2013)

Para la implementación de este estudio en la parcela experimental se tendrá en cuenta que en el muestreo para la creación de superficies adecuadas (mapas) normalmente necesita tamaños de muestras de 20 a 30 para superficies simples, de 30 a 50 para superficies más complejas y de 100 a 150 para evaluación geo-estadística.

Para un detallado estudio de estas propiedades se dispone de muestras experimentales del área de la parcela experimental, donde a partir de estas, se realizó un mapa específico del comportamiento de la conductividad hidráulica en dicha área, para esta actividad se utilizaron herramientas de estudio en sistemas de información geográfica (S.I.G.), en este caso se utilizó la herramienta computacional ArcGIS 10.2, el cual es una plataforma para el diseño y gestión de soluciones a través de la aplicación de los conocimientos geográficos.

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Se puede pensar en el sistema ArcGIS 10.2 como en una infraestructura para elaborar mapas y poner la información geográfica a disposición de los usuarios dentro de un departamento, por toda una organización, entre varias organizaciones y comunidades de usuarios o en Internet, para cualquier usuario interesado en acceder a ella.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1. Caracterización inicial del suelo

A continuación en la tabla 9 se presenta la caracterización propia del suelo de área de la parcela experimental del Laboratorio de Suelos y Aguas LASA, identificando los aspectos propios de la zona que influencia en el comportamiento de las propiedades Hidrofísicas.

#### 6.1.1. Caracterización del suelo.

Tabla 9. Caracterización inicial del suelo en parcela experimental del Laboratorio de Suelos Y Aguas L.A.S.A. 2015

Perfil No:	VA16- Tipo de perfil: Modal.
Nombre del suelo y taxonomía:	Typic Haplustolls, Francosa Fina, isohipertérmica UCS: Consociación Typic Haplustolls, francosa fina, isohipetérmica Simbolo: CFa
Unidad cartográfica:	Consociación Arroyo (AY)
Localización geográfica:	Departamento: Valle del Cauca. Municipio: Santiago de Cali
Sitio:	Granja experimental, Universidad del Valle, sede Meléndez
Coordenadas geográficas:	3° 32'22" N, 76° 31'57" W
Altitud:	976 msnm.
Paisaje:	Piedemonte. Tipo de relieve: Abanico aluvial reciente.
Forma del terreno:	Base.
Material parental:	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones medianos)
Clase de pendiente:	Plana. Grado de pendiente: 0-3%, Clase: Plana, Longitud: Muy Plana, Forma de la Pendiente: Recta.
Clima ambiental:	Cálido, seco
Clima edáfico:	Régimen de humedad ústico, régimen de temperatura isohipertérmico
Drenaje:	Interno medio, externo Lento, natural bien drenado.
Profundidad efectiva:	Profunda (150 cm). Limitante de la profundidad efectiva: Ninguna
Clase de Fertilidad:	Moderada
Uso actual de la tierra	Ganadería, pastoreo semi-intensivo (vacuno)
Características diagnósticas: Régimen de humedad	Epipedón molico, endopedón cámbico Otras UCS que representa este perfil: Ninguna



## 6.2. Caracterización Físico-Química del suelo

En la tabla 10 se ilustran los resultados de las características físicas y químicas del suelo asociadas a la regulación hídrica del suelo

Tabla 10. Características físicas y químicas del suelo.

VARIABLES	PROFUNDIDAD DE EVALUACION(cm)	RESULTADOS
Orden		Typic Haplustolls (Arcila y López, 2012)
Textura	0-20	franco arcilloso
Densidad Aparente	0-10	1,24 g/cm <sup>3</sup>
Arena (%)	0-10	49
Limo (%)	0-10	15,24
Arcilla (%)	0-10	35,7
DPM (mm)	0-20	1,33
	20-30	1,30
DGM (mm)	0-20	1,32
	20-30	1,28
Porosidad Total (%)	0-10	58,30%
	10 a 20	53,90%
Macroporosidad (%)	0-10	10,50%
	10 a 20	6,80%
Microporosidad (%)	0-10	52,40%
	10 a 20	46,30%
Materia Orgánica (%)	0-20	4,50%
CIC (Cmol. kg <sup>-1</sup> de suelo)	0-20	18 meq
Infiltración Básica(Mm/Hora)	0-30	7,9 mm/h
Conductividad Hidráulica(Mm/Hora)	0-30	21,9 nmm/h

### 6.2.1. Textura

La textura del suelo determinada a través del método de Bouyoucos fue franco arcilloso, considerado como de textura mediana, a partir del análisis del porcentaje de dispersión de arenas, limos y arcillas. Según (Jaramillo, 2002) este método es especial para suelos que tengan bajos contenidos de materia orgánica; identificando este resultado de acuerdo con los resultados obtenidos de dispersión de arenas, limos y arcillas porcentajes respectivamente de arenas (39,94%), arcillas (35,57%) y limos (24,48%).

Con el manejo adecuado son suelos altamente productivos y en general, se consideran como suelos agrícolas de muy buena calidad.

Tabla 11. Agrupación general de clases texturales de acuerdo con su similitud en el comportamiento hidrodinámico. (Castro. 1998).

GRUPO DE TEXTURAS	TIPO DE SUELO	CLASE TEXTURAL
Gruesas	Suelos arenosos	Arenosa (A) Arenosa franca (AF)
Moderadamente gruesas	Suelos francos con dominio de arena	Franco arenosa (FA)
Medias	Suelos francos	Franca (F) Franco limosa (FL) Limosa (L)
Moderadamente finas	Suelos francos con dominio de arcilla	Franco arcillo arenosa (FArA) Franco arcillo limosa (FArL) Franco arcillosa (FAr)
Finas	Suelos arcillosos	Arcillo arenosa (ArA) Arcillo limosa (ArL) Arcillosa (Ar)

### Prácticas de Manejo y Conservación

Protección para las áreas susceptibles a inundaciones. Control de la erosión hídrica en base a surcos en contorno, cultivos en fajas, cultivos de cobertura, y rotación de cultivos, de preferencia con leguminosas. Establecimiento de programas racionales de fertilización acorde con las características del complejo suelo-planta. (OAS, 1997)

### Uso y Cultivos Apropriados

Maíz, arroz, zapallo, sandía, frijol, hortalizas, caña de azúcar, ñame, piña, yuca, pastos y frutales nativos. Plátano y banano, fundamentalmente en las áreas que se inundan periódicamente. (OAS, 1997)

### 6.2.2. Densidad aparente

La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo. Valores altos de ésta propiedad indican baja porosidad, grado de compactación, restricciones al crecimiento de raíces, baja infiltración de agua y poco movimiento de aire en el suelo (Arshad et al., 1996 citado por USDA, 1999).

En la tabla 10 se puede observar que a la profundidad de 0 – 10 cm, la densidad aparente promedio fue de 1,24 g/cm<sup>3</sup> realizado a través del método de la Densidad Aparente en Húmedo (Tafur, 2014a), figura 11, donde se aprecia que la densidad aparente encontrada está dentro de los rangos de densidad aparente para este tipo de suelo (SSDS, 1993). Cabe tener en cuenta, que para el suelo de la parcela experimental, se analizó el grado de compactación de los valores de las medias de densidad aparente a partir del año 2012 hasta el 2015, indicando que no se presenta un grado de compactación considerable para la parcela experimental, debido a que a través del coeficiente de variación obtenido del 6%, este no es representativo, ya que su bajo porcentaje indica que no hay variación brusca entre los valores y que estos no aumentaron su valor permaneciendo asociados a la textura propia del suelo.

En la figura 11 se muestra el método de la Densidad Aparente en Húmedo propuesto por (Tafur, 2014a), donde en la tabla 12 se encuentra el análisis de estadístico realizado entre el método actual de experimentación de Densidad Aparente en Húmedo y el método de Terrón Parafinado (Blake y Hartge, 1986) utilizado en el Laboratorio de Suelos y Aguas LASA para el análisis de esta propiedad.



Figura 11. Medición en campo a través del método de la Densidad Aparente en Húmedo (Tafur, 2014a) en la parcela experimental del Laboratorio de Suelos Y Aguas L.A.S.A. 2015.

Tabla 12. Descripción de metodologías estadísticas usadas para la comparación de los métodos de análisis para la densidad aparente.

DESCRIPCIÓN	MÉTODOS	
	TERRON PARAFINADO	DENSIDAD APARENTE EN HUMEDO
Media	1,32	1,24
Varianza	0,0086	0,0022
Coefficiente de Variación %	7,01	3,78
Coefficiente de Correlación de Pearson	0,47	
Coefficiente de Determinación	0,22	
Estadístico T (una cola)	0.000744	

A partir de los resultados obtenidos mostrados en la tabla 12, se evidencia que el coeficiente de variación para el análisis de estas pruebas fue preciso según los valores arrojados, brindando confiabilidad en los datos; para el análisis de Correlación de Pearson se obtuvo un valor del 47 % y un Coeficiente de Determinación de 22% lo que quiere decir que no existe una correlación fuerte para realizar pronósticos.

Para los valores arrojados de coeficiente de variación, indican que el método más homogéneo para la determinación de la densidad aparente, fue el Método de la Densidad Aparente en Húmedo propuesto por (Tafur, 2014a), ya que su CV fue menor que el del Método de Terrón Parafinado, indicando que este es más confiable en los valores arrojados.

Teniendo en cuenta el resultado arrojado para el análisis de T-Student se dice que la significancia para este caso no se rechaza la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocación de 0.05.

En la figura 12 se puede observar la distribución de los datos en la comparación de ambos métodos:

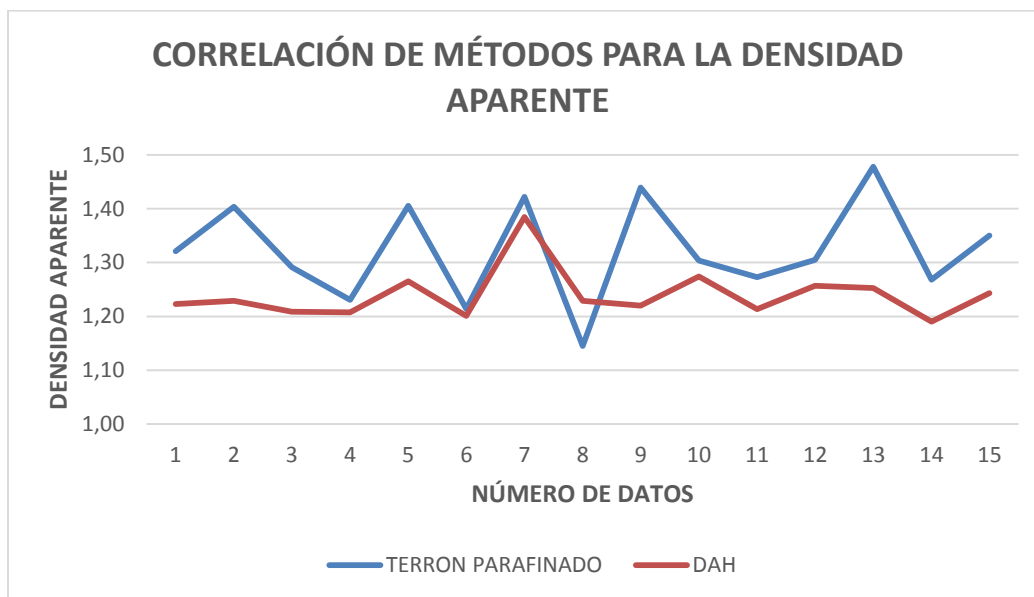


Figura 12. Distribución de Correlación entre métodos de análisis de la densidad aparente del suelo en la parcela experimental del Laboratorio de Suelos Y Aguas L.A.S.A. 2015.

### 6.2.3. Estabilidad de Agregados

Se aprecia en el análisis de distribución de agregados para el caso de estudio que a ambas profundidades tiene una gran importancia los agregados de tamaños grandes, teniendo en cuenta que a la profundidad de 0 – 20 cm el 88,70% de los agregados tienen diámetro mayor a 2 mm, en los siguientes 10 cm de profundidad esos agregados tiene un porcentaje del 85,21% del total; así mismo se observa que solo el 3,53% de los agregados en los primeros 20 cm tienen tamaño menor a 0,5 mm, en la segunda profundidad esos agregados alcanzan el 3,25%; por lo que no existen agregados indeseables que contribuyen a la aireación del suelo.

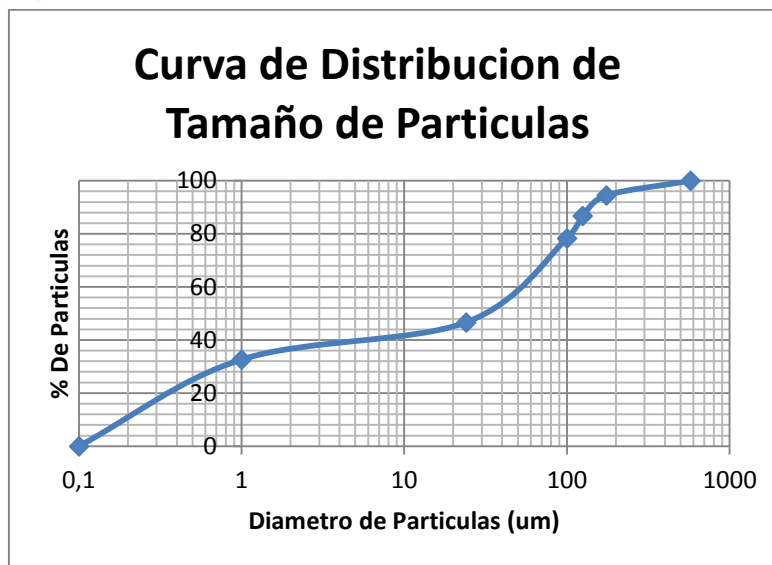


Figura 13. Curva Característica de Tamaño de Partículas para la parcela experimental de la universidad del valle L.A.S.A. - 2015.

La estructura del suelo involucra la forma, grado y tamaño de los agregados, para el caso del suelo de la parcela experimental, la estructura del suelo afecta la porosidad y por lo tanto, la retención y disponibilidad de agua, además de su capacidad para contener aire (Acevedo y Martínez, 2003). La porosidad afecta, además, el crecimiento de las raíces de los cultivos (Acevedo y Martínez, 2003).

En la actualidad existen diferentes teorías acerca del tamaño óptimo de los agregados para el desarrollo de las plantas. Para Hoyos (1999) define una buena estructura del suelo para el crecimiento de cultivos con agregados entre 1 y 10 mm de diámetro, según Juárez (2005), sitúa este tamaño entre 1 y 5 mm, para el mismo autor los agregados inferiores a 0.5 mm se limitan a bloquear los poros más gruesos a través de los cuales puede filtrar el agua y penetrar el aire en el subsuelo, sin contribuir a la capacidad de retención de humedad, mientras que para los agregados de más de 5 a 6 mm ordinariamente tienen a su alrededor un espacio aéreo demasiado grande para las raicillas de las plantas.

Para Arias (2001), el tamaño ideal de agregados oscila entre los 0,50 – 2,00 mm de diámetro; agregados mayores restringen el volumen de suelo explorado por la raíces y agregados menores originan poros muy pequeños y no drenables por acción de la gravedad, de acuerdo a esto el suelo de la parcela experimental no posee problemas que afecten la aireación y el drenaje del suelo.

Rothon (2000) encontró una correlación positiva entre el porcentaje de estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica en el suelo. La Porosidad y retención de agua son dos parámetros que se encuentran estrechamente vinculados ya que la capacidad de

retención de agua en el suelo es dependiente del número de poros, de la distribución de tamaño de poros y de la superficie específica de cada suelo. Krull *et al.*, 2004, Pikul y Almiaras, 1986, estudiaron la distribución del espacio poroso con diferentes manejos de suelo y encontraron que al agregar materia orgánica aumentaban los poros de mayor diámetro, que retienen el agua con menor energía.

En la tabla 8 El Diámetro Ponderado Medio (DPM) del suelo encontrado en los primeros 20 cm fue de 1,33 mm y entre 20-30 cm fue de 1,30mm teniendo mínimas diferencias entre los valores obtenidos para cada profundidad arrojando variaciones del 3,23% para el análisis de 0-20cm y de 4,11% para los siguientes 10 cm lo que representa variaciones mínimas en el suelo de estudio.

Para el Diámetro Geométrico Medio (DGM) se describen en la tabla 8 valores para cada profundidad analizada, considerando que para los primeros 20 cm se obtuvo un valor de 1,32mm y para los siguientes 10 cm un valor de 1,28mm, indicando poca variabilidad de esta propiedad a ambas profundidades y distribución normal de los datos, indicando una un coeficiente de variación entre los datos de 17,8% en la profundidad de 0 -20cm y de 14,9% en los próximos 10cm de profundidad de análisis arrojando mayor dispersión que los datos de (DPM).

A diferencia del DPM, el DGM del suelo disminuye con la profundidad, es mayor a la profundidad de 0 – 20 cm y menor en los siguientes 10 cm; a pesar de que esta variación con la profundidad no es alta, indica que generalmente los primeros centímetros presentan una mayor estabilidad de los agregados, lo cual pone en evidencia que la capacidad hídrica de regulación en el suelo de la parcela experimental está influenciada por esta característica, identificando mayor porcentaje de almacenamiento y mejor drenaje en estos primeros centímetros.

#### **6.2.4. Porosidad**

Se puede observar un crecimiento apreciable en la porosidad superficial (0 – 20 cm) y subsuperficial (20 – 30 cm) del suelo. Se aprecia que la porosidad total del suelo a ambas profundidades ese mantiene por mayor a los 50% figura 14. Según Florentino (1994), una porosidad total es máxima cuando está el rango del 40% para este tipo de suelo franco arcilloso, para el caso de estudio los resultados a ambas profundidades son excelentes ya que estos superan el rango propuesto y se evidencia en la buena capacidad de regulación hídrica y retención de agua de la parcela experimental, considerando que a valores Espacio Poroso Total mínimos se considerarán como “valores críticos” o limitantes al desarrollo de las raíces.

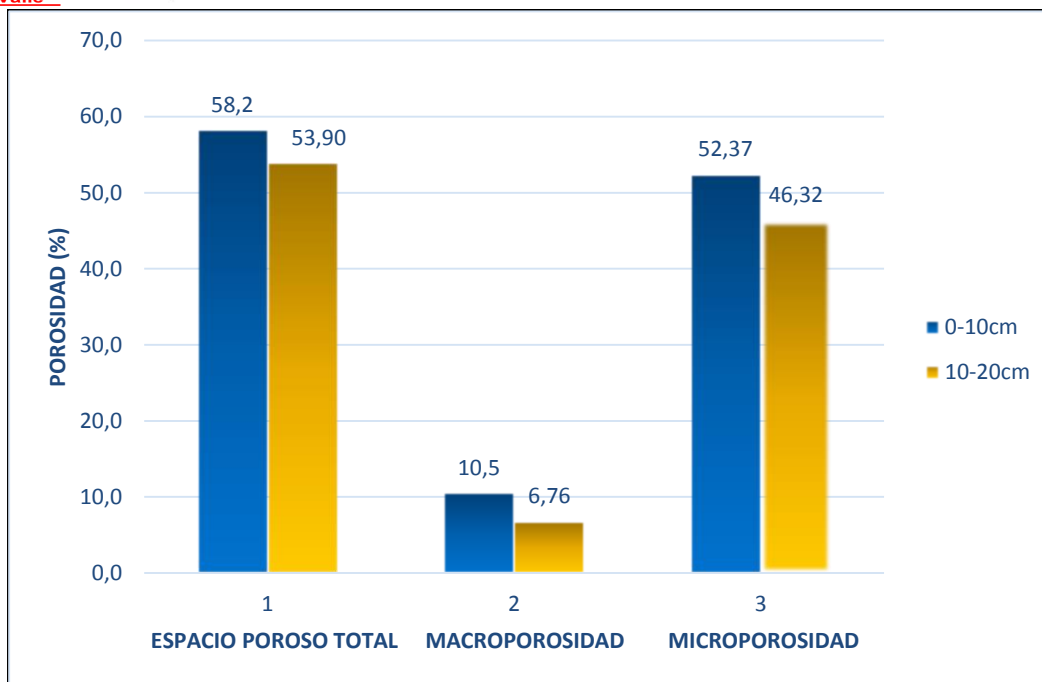


Figura 14. Distribución de la Porosidad del suelo evaluada a dos profundidades en la parcela experimental del Laboratorio de Suelos Y Aguas L.A.S.A. 2015.

Con relación a la distribución de poros (figura 14), la macroporosidad a las dos profundidades medidas es diferente siendo menor a la profundidad de 20- 30 cm con un 6,76%, según *Baver., et al (1973)* cuando la macroporosidad es menor del 10 %, se restringe la proliferación de raíces, valor también establecido por *Pla*, citado por *Cortés y Malagón (1984)* y es de tener en cuenta que la capacidad de regulación hídrica se ve afectada ya que la que la capacidad de almacenamiento del agua es restringida debido a los bajos de porcentajes de macroporosidad obtenidos *Pla (1977)* establece que con aportes controlados de agua (riego) dicho valor límite podría bajarse a 6 u 8 %.

A diferencia de la macroporosidad, la microporosidad disminuyó con la profundidad, siendo mayor a la profundidad de 0 – 20 cm con un 52,37%. Según *Núñez (2000)*, para el caso de estudio se evidencia el predominio de la microporosidad donde se garantiza una buena capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, pero lo vuelve susceptible a problemas de drenaje y a la compactación, lo que lleva a la generación de compuestos tóxicos para las plantas por efecto de las condiciones reductoras que pueden generarse debido a la disminución de la aireación del suelo.



### 6.2.5. Materia Orgánica

Los contenidos de materia orgánica en los primeros 20 cm de profundidad estuvieron con un valor promedio de 4,50%. De acuerdo a Brito *et al.*, (2004), estos valores son considerados como adecuados y según la clase textural de estos suelos (Franco-Arcilloso, texturas medias) deben ser mayores al 4%, considerándolos como altos. Es de tener en cuenta que la influencia del relieve es determinante tanto en la cantidad como en la calidad, donde a mayor altitud mayor acumulación de la Materia Orgánica estos valores se asocian a los arrojados para este piso térmico donde la media para el clima medio esta entre el 3 y 5%. (Jaramillo, 2002). En Colombia los más altos contenidos de materia orgánica se encuentran en los Andisoles de los pisos climáticos fríos (Jaramillo *et al.*, 1994), ya que en estos suelos la materia orgánica forma complejos muy estables con materiales inorgánicos no cristalinos que dificultan su degradación, favoreciendo que se acumule.

La materia orgánica influye positivamente en todas las propiedades del suelo, tanto:

- físicas

✓ Incrementa la capacidad de retención del agua del suelo. El aumento global de la porosidad y la naturaleza coloidal de la materia orgánica hace que la capacidad del suelo para almacenar agua se vea muy favorecida, de manera que se protege a los cultivos tanto de la acción de las precipitaciones intensas (el exceso de agua drena mejor y la acción de la lluvia no daña a la estructura del suelo) como de la sequía (el suelo almacena más agua embebida en los poros de menor tamaño y en el humus).

✓ Aumenta la estabilidad estructural.

✓ Aumenta la aireación.

✓ Aumenta la permeabilidad.

✓ Facilita el laboreo al disminuir la cohesión cuando están secos y los hace más ligeros y menos encharcadizos cuando están húmedos, por lo que aumenta el tiempo de tempero.

✓ Los suelos son más oscuros, por lo que absorben más radiación y son más cálidos.

- químicas:

✓ La mineralización de la materia orgánica libera al suelo gran cantidad de elementos esenciales.

✓ Regula el pH del suelo.

✓ Influye en la CIC, aumentándola y por lo tanto, aumentando la fertilidad química del suelo.

✓ Inmoviliza metales pesados.

## 6.2.6. Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), es un parámetro que suministra información sobre la concentración de nutrientes y su disponibilidad de ser absorbidos por las plantas, a mayor CIC, mayor fertilidad potencial del suelo y menor lixiviación de cationes (Parra *et al.*, 2003). En la tabla 8 se puede apreciar que el valor de esta propiedad es 18 meq/100g de suelo con un coeficiente de variación del 34%.

López *et al.*, (2006) considera este valor de entre medio a alta para texturas franco arcillosas. De acuerdo a los datos arrojados para el caso de estudio, esto interviene en el potencial mátrico, en cuanto que los valores de CIC asociados, indican que el suelo de la parcela experimental posee una buena capacidad de retención de agua dentro de los capilares o poros del suelo cuando esta insaturado, lo que indica mayor concentración de nutrientes en el suelo de la parcela experimental y disponibilidad de ser absorbidos por las plantas.

## 6.2.7. Infiltración

Respecto a la infiltración, es la propiedad que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo, a continuación se presenta una tabla con los valores de infiltración para los suelos según la textura:

Tabla 13. Fluctuación de la velocidad de infiltración básica según la textura del suelo (Brouwer *et al.*, 1988).

Tipo de suelo	Velocidad de infiltración básica (mm h <sup>-1</sup> )
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20-30
Franco	10-20
Franco arcilloso	5-10
Arcilloso	1-5

En la tabla 8 se puede apreciar que el suelo presentó un rango de la velocidad de infiltración, con un valor promedio de 7,9 mm/h y un coeficiente de variación de 30% indicando una velocidad de entrada del agua al suelo baja (lenta), La USDA (1999) reporta que velocidades de infiltración entre 1.52 –0.51 cm/hora como lentas. Así mismo Valverde (2007), reporta según la textura del suelo franco arcillosa comprende velocidades de infiltración entre 0,2 – 1,5 mm/h valores en los cuales se ubican los determinados en este estudio.

Esto indica que los resultados obtenidos para la parcela experimental arrojan que el suelo estudiado posee una capacidad de retener agua alta y un drenaje bajo; relacionándolo con lo obtenido en el análisis de porosidad donde estos resultados muestran un suelo con un porcentaje de más del 50% con características excelentes en el aprovechamiento del agua, retención en los poros y capacidad de regulación.

#### **6.2.8. Conductividad Hidráulica Saturada**

La conductividad hidráulica es probablemente la característica de los suelos más importante a estimar. Son múltiples los problemas que pueden ser resueltos si se cuenta con esta prueba, especialmente en relación con los sistemas de riego y drenaje de las tierras. La conductividad hidráulica permite calcular la profundidad y espaciamiento apropiado de los drenes subsuperficiales, los canales de riego y para evaluar y calcular las pérdidas de agua

En relación con esto la conductividad hidráulica para el análisis experimental, se observa en la tabla 8 que estuvo alrededor de 21,9 mm/h con un coeficiente de variación de 19,7%, mostrando una baja variabilidad del suelo en estudio. Los más bajos valores en densidad aparente coincidieron con los mayores valores de conductividad hidráulica, debido a un aumento de la porosidad total especialmente la microporosidad ya que no se identifican grados de compactación considerables en relación al aumento de los valores en la densidad aparente.

En relación con el valor arrojado de conductividad hidráulica, según Villón, (2007) conductividades hidráulica entre 0,5 y 1,5 cm/día se catalogan como moderadas, en este sentido el suelo presenta conductividad hidráulica moderada para el tipo de suelo franco arcilloso encontrado en la zona de estudio. . Estos resultados también concuerdan con lo expuesto por Villón (2007) quien presenta que según la textura y la estructura para suelos franco arcillosos con buena estabilidad poseen conductividades hidráulicas entre 0,02-0,2m/día (0,83-8,33 mm/h), valores entre los cuales se ubican los determinados en este estudio.

### **6.3. Aplicación herramientas computacionales (software Hydrus-2D) en la determinación de la Conductividad Hidráulica Saturada ( $K_s$ ) y la estimación de la curva característica de retención de humedad.**

Luego de la obtención de las propiedades asociadas la regulación hídrica del suelo mediante pruebas en campo y laboratorio, para las muestras representativas se pasó a implementación de software Hydrus 2D para la determinación de la Conductividad Hidráulica Saturada ( $K_s$ ) y la estimación de la Curva Característica de Retención de Humedad a partir de los datos arrojados del muestreo experimental que se requieren de entrada para su determinación. Para esto definieron en primera instancia los parámetros de entrada al software los cuales son las unidades de medida en este caso unidades tanto métricas, de tiempo, tipo de simulación en este caso es el de movimiento de agua en el suelo, áreas de análisis las cuales fueron definidas a partir de la georeferenciación hecha con GPS donde se determinaron Polígonos de Thiessen para definir las áreas de influencia de ese punto, se definieron los modelos de análisis con que cuenta el software y el posterior tratamiento de la información obtenidas. En la tabla 14 se muestran los análisis estadísticos correspondientes los datos arrojados de Conductividad Hidráulica Saturada ( $K_s$ ) durante la simulación con el software Hydrus-2D comparándolos con lo encontrado con el método experimental del pozo invertido (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002).

Tabla 14. Estadística descriptiva de las diferentes conductividades hidráulicas determinadas por el software Hydrus -2D a través del uso de diferentes metodologías. Laboratorio de suelos y aguas L.A.S.A., 2015.

	Ks Experimental (mm/h) pozo invertido	modelo de Van Genuchten (1980) - Mualem (1976)		modelo modificado de Van Genuchten - Mualem (1976)		modelo Brooks - Corey (1964)	modelo Kosugi (log normal) (1996)
		Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	ks (mm/h) (Índice Rosetta - Redes Neuronales)	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	ks (mm/h) (Índice Rosetta- Redes Neuronales)	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D
Media	21,88	6,26	15,132	6,26	15,132	4,88	6,26
Moda	0	2,6	0	2,6	0	2,3	2,6
Máximo	28,71	13,1	26,5	13,1	26,5	13,2	13,1
Mínimo	17,06	2,6	9,38	2,6	9,38	2,3	2,6
Desviación Estándar	4,30	5,10	7,10	5,10	7,10	4,73	5,10
Coef. Variación (%)	19,66	81,50	46,90	81,50	46,90	96,95	81,50
Varianza	18,51	26,03	50,37	26,03	50,37	22,38	26,03

En la tabla 14 se muestran los valores del coeficiente de variación (CV) de las conductividades hidráulicas analizadas, donde los rangos encontrados están entre 19,7%-96,9%, siendo el método del Pozo Invertido (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002) el menos variable con un (19,7%) de los datos arrojados y el modelo Brooks-Corey (1964) en la simulación el más variable (96,9%) de los datos para la profundidad de análisis de 30cm para un 95% de confianza.

#### **6.4. Análisis de comparación de los resultados de las propiedades hidrofísicas medidas mediante módulos estadísticos frente a las determinadas experimentalmente.**

##### **6.4.1. Simulación de la Conductividad hidráulica ( $K_s$ ).**

A partir de la entrada de estos criterios se procedió a la simulación de los datos. Los coeficientes de correlación de las conductividades hidráulicas determinadas por el método del Pozo Invertido (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002) comparados con las arrojadas por los distintos modelos del software Hydrus 2D a la profundidad de 30cm son variables; los métodos difieren entre sí pues no existe correlación alta entre ellos exceptuando los índices determinados partir del análisis utilizando la predicción con Red Neuronal del Indicador Rosetta (Schaap, 1999) de los modelos de van Genuchten (1980) – Mualem (1976) y el modelo modificado de las ecuaciones de van Genuchten (1980)– Mualem (1976) (Vogel y Cislerova, 1988), identificando una correlación del 60% con el valor analizado experimentalmente. En la tabla 15 se identifican los valores de correlación de Pearson, Coeficientes de Determinación y los Errores Típicos, el Error Cuadrático Medio, la Raíz del Error Cuadrático Medio, los valores para la prueba F y T, encontrados de la variables obtenidas de la simulación hecha con los modelos del software Hydrus 2D, frente a la determinada con el análisis experimental implementado en el laboratorio L.A.S.A.

Tabla 15. Correlación de diferentes conductividades hidráulicas simuladas a partir del análisis experimental del pozo invertido (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds et al., 2002) para 5 muestras experimentales a 30 cm de profundidad en el suelo de la parcela experimental del laboratorio L.A.S.A. en el año 2015

VARIABLE		Modelo de van Genuchten (1980) - Mualem (1976)		Modelo Modificado de van Genuchten - Mualem (1976)		Modelo Brooks - Corey (1964)	Modelo Kosugi (Log Normal) (1996)
		Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	ks (mm/h) (Indicador Rosetta Redes Neuronales)	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	ks (mm/h) (Indicador Rosetta Redes Neuronales)	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D	Ks (mm/h) Simulada Hydrus 2D
Ks Experimental (mm/h) pozo invertido	Pearson	0,40	0,60	0,40	0,60	-0,50	0,40
	Coef. Determinación R <sup>2</sup>	0,16	0,36	0,16	0,36	0,25	0,16
	Estadístico P (dos colas)	0,0026	0,057	0,0026	0,057	0,008	0,0026
	Prueba F	0,75	0,36	0,75	0,36	0,86	0,75
	Error Típico	4,58	4,00	4,58	4,00	4,36	4,58
	-MSE (mm/mm) <sup>2</sup>	0,79	2,79	0,79	2,79	0,44	0,79
	RMSE(mm/mm)	0,89	1,67	0,89	1,67	0,66	0,89

N: número de datos

MSE: Error Cuadrático Medio

RMSE: Raíz Del Error Cuadrático medio

### Sensibilidad del Modelo

En la tabla 15 se identifican los balances estadísticos para los datos arrojados de la simulación y validación hecha con el software Hydrus 2D donde se muestra que se obtuvo un coeficiente de determinación aceptable ya que las correlaciones obtenidas en la simulación hecha con los modelos de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) en el análisis hecho con índice de software Rosetta, muestra un coeficiente de correlación del 60 % para los primeros 30 cm, esto muestra que los datos tienen relación con los simulados con el software, esto significa que se tiene de igual forma

un coeficiente de determinación del 36% de confiabilidad, lo que indica que sirve para realizar pronósticos y que tiene validez estadísticamente; estas condiciones pudieron verse a la entrada de los datos al inicio de la simulación en gran medida a la estructura, la textura, y densidad aparente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rubio *et al*; (2005), donde se encontraron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre las humedades volumétricas observadas y simuladas a partir del modelo de van Genuchten (1980) en validación,  $p \leq 0.01$ ,  $p \leq 0.05$  de entre 40% y 60% estos resultados muestran que, Hydrus simula aceptablemente los flujos hídricos en los niveles superficiales (-20 cm), siendo capaz de simular, tanto la rápida humectación como la respuesta a la demanda evapotranspirativa.

En la tabla 15 también se identifica el valor del P estadístico arrojado por la prueba F, donde se muestra que los modelos tienen valores de significancia variables. En este caso los modelos de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y el modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) en la utilización del índice Rosetta Lite, tuvieron valores de p mayores al 0.05 de significancia, identificando que para este caso las varianzas de los datos obtenidos se asemejan (estadísticamente); caso contrario sucede con los otros modelos dispuestos en la tabla 15 donde estos, tuvieron valores de p de significancia menores a 0,05 lo que demuestra que sus varianzas no se asemejan esto se debió a que estos métodos difieren entre sí pues no existe ninguna correlación alta entre ellos.

En cuanto a los valores arrojados de la prueba de T- Student se identifica que la correlación entre los valores simulados con los determinados experimentalmente mostraron que la hipótesis nula de igualdad de varianzas y e igualdad medias no fue rechazada para un nivel de significancia del 5% lo que permite concluir que la hipótesis se acepta solo para los modelos de de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y el modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) en la utilización del índice Rosetta Lite: pero se rechaza para los otros modelos de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y el modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) sin que se utilice el índice Rosetta y en los modelos de Brooks - Corey (1964) y Kosugi (Log Normal) (1996) ya que su varianzas y medias difieren entre sí con valores por debajo de los aceptados.

Es de tener en cuenta que los errores medios cuadráticos (RMSE Y MSE) obtenidos representan la desviación de los valores simulados a partir de los observados de una manera más amplia (Kobayashi y Salam, 2000), en este caso se evidencia que se obtuvo un valor de RMSE aceptable ( $<2,00$ ) (Schaap y Leij, 2000) para los valores simulados; teniendo en cuenta que los valores arrojados de RMSE están mejor distribuidos en los análisis hechos con los modelos de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) con el indicador del Rosetta Lite, que con los hechos con los modelos de

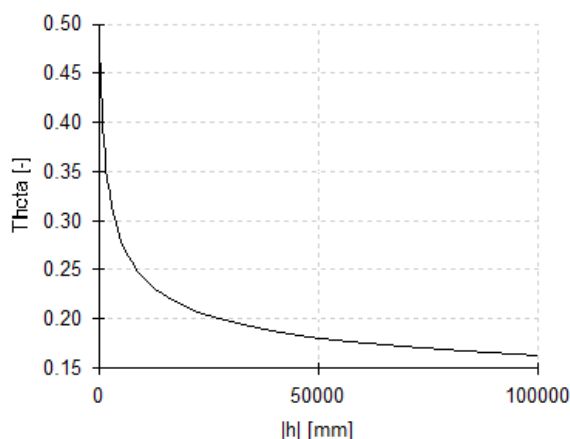


van Genuchten (1980) - Mualem (1976), modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) sin el indicador, Modelo Brooks - Corey (1964) y Kosugi (Log Normal) (1996).

#### 6.4.2. Curva de Retención de Humedad

A continuación en la figura 15, se muestra la curva de retención de humedad obtenida para un suelo franco arcilloso, a una profundidad de 30 cm en la parcela experimental de la universidad del valle LASA a través del software Hydrus-2D.

Hydraulic Properties: Theta vs. Head



(h): Contenido de Humedad.

(-)Theta: Cabeza de presión.

Figura 15. Curva de Retención de Humedad de un suelo Franco Arcilloso para una profundidad de 30 cm, simulada a través del software Hydrus-2D con el modelo van Genuchten (1980) - Mualem (1976) usando redes neuronales de Rosetta –lite.

A partir de la figura 15 se identifican que las curvas arrojadas por el modelo van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y modelo modificado van Genuchten (1980) - Mualem (1976) usando redes neuronales de Rosetta –lite, son las que mayor validez tienen ya que los datos arrojados durante análisis, presentan mayor correlación con los datos determinados experimentalmente, con valores de coeficiente de determinación del 36% analizados anteriormente y correlaciones del 60%. En este caso la Curva Característica de Retención de Humedad como salida del modelo proporciona información valiosa para aplicaciones prácticas, tales como la determinación de la fecha de siembra, aplicación de riego y fertilizantes (Rubio et al., 2005).

El conocimiento de la capacidad de retención de agua del suelo es importante para la realización de diversas investigaciones e interpretaciones de las relaciones suelo — agua. La misma afecta directamente la infiltración, el flujo de agua, el drenaje, el transporte: de

solutos, las labores del suelo, el manejo de riego y la disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos. (Calle & Proaño, 2003).

#### 6.4.2. Relación Lineal entre la Conductividad Hidráulica y algunas Propiedades Físicas del Suelo

Como en el análisis de correlación el software Hydrus 2D, solo se correlacionaron los datos arrojados por los modelos de van Genuchten y modificado van Genuchten (los índices de las redes neuronales Rosetta) con las conductividades usadas como testigo, se buscó la posible causa de este resultado a partir de un análisis de Regresión Múltiple, utilizando las conductividades como variables dependientes para esto se usó el programa SPSS versión 23.

Para la conductividad hidráulica saturada determinada por el método del pozo invertido (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002) para las muestras de suelo disturbadas, los modelos de mejor ajuste fueron:

$$K_s = -491,067 + 592,764 (DPM) - 334,590(Dens_{Apa}) + 3,404(Re_{arc}) + 0,397(Porc_{ret})$$

$$R^2 = 1$$

$$K_s = -890,438 + 1,379 (\%macrop) + 3,703(Cont_{hum}) + 182,282(Cont_{MO})$$

$$R^2 = 0,75$$

Donde  $DPM$  es el diámetro medio ponderado de las partículas,  $Dens_{Apa}$  es la densidad aparente de suelo estudiado (índice de compactación),  $Re_{arc}$  es la relación de arcillas,  $Porc_{ret}$  es el porcentaje de agregados estables retenidos por el tamiz de 2mm,  $\%macrop$  la macroporosidad del suelo analizado,  $Cont_{hum}$  es el contenido de humedad del suelo en el momento de la muestra y  $Cont_{MO}$  es el contenido de materia orgánica.

La Conductividad Hidráulica Saturada depende, según las funciones, del contenido de humedad, la textura, la porosidad de aireación, la estabilidad de agregados, del grado de compactación y de la materia orgánica.

En general se observa que el software Hydrus – 2D simula aceptablemente los flujos hídricos en los niveles superficiales (-30 cm), donde se evidencia que se tuvo inconvenientes en las correlaciones por parte de los modelos frente al análisis experimental, donde es de considerar que para los modelos de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) y modelo modificado van Genuchten (1980) - Mualem (1976) usando redes neuronales de Rosetta – lite, la conductividad hidráulica saturada determinada por el método del pozo invertido

(Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002) fueron los modelos de mejor ajuste.

Estudio como los de Lozano *et al.*, (2005) en palabras de Restrepo, (2013), concuerdan con el caso en que el índice Rosetta lite para la simulación conductividad hidráulica Saturada no tuvo aplicación en suelos de arcillas expansibles dadas sus bajas correlaciones con los testigos. La variabilidad dependió en gran medida de la estructura, la textura, la consistencia y el drenaje. También Givi *et al.*, (2004), en suelos de textura franco arcillosos y arcillosos, determinaron que el índice Rosetta (Schaap, 1999) aunque tuvo una alta correlación con los resultados observados para la conductividad hidráulica, su MSE fue alto, lo que indicó un bajo rendimiento del modelo, este hecho se explicó porque los suelos utilizados en el desarrollo del modelo eran diferentes de los suelos estudiados, es decir, no estaban en el rango de los utilizados para desarrollar el índice.

Muchos investigadores hacen énfasis en que las funciones de pedotransferencia del índice Rosetta (Schaap, 1999) deben aplicarse a los suelos cuyas características son similares a las de los suelos de los que proceden las funciones (Cornelis *et al.*, 2001 y Nemes *et al.*, 2002). Aunque el suelo de estudio es de textura franco arcillosa y localizado en la zona plana e influenciado por la llanura del río Cauca y los conos aluviales de los ríos Lili y Meléndez, estos se caracterizan por ser depósitos aluviales y altos contenidos de nutrientes, los cuales fueron utilizados para desarrollar el índice de Rosetta; es de tener en cuenta que al hablar de los contenidos de materia orgánica para este caso son mayores 4,0%, lo que genera cambios y aumentos en las propiedades hidráulicas del suelo, presentándose así bajo rendimiento en el modelo, es por ello que esta es una característica que debe ser incorporada en el modelo del índice Rosetta lite en el software Hydrus-2D.

Rawls *et al.*, (2003) llegaron a la conclusión de que al incorporar el contenido de carbono orgánico al modelo Rosetta se presenta una mejora de las estimaciones de la conductividad hidráulica y retención de agua en el suelo.

## 6.5. Representación de la variabilidad espacial del comportamiento de la Conductividad Hidráulica ( $K_s$ ) del suelo de la Parcela Experimental de la Universidad del Valle

L.A.S.A. 2015

En la Figura 16 se presentan los mapas de distribución espacial para la variable Conductividad Hidráulica Saturada ( $K_s$ ) obtenidos mediante la implementación del método de interpolación Kriging Simple, en la herramienta computacional ArcGis 10.2. Esta distribución espacial está influida por la geomorfología de la zona de estudio, la cual tiene una pendiente plana del 0 al 3%.

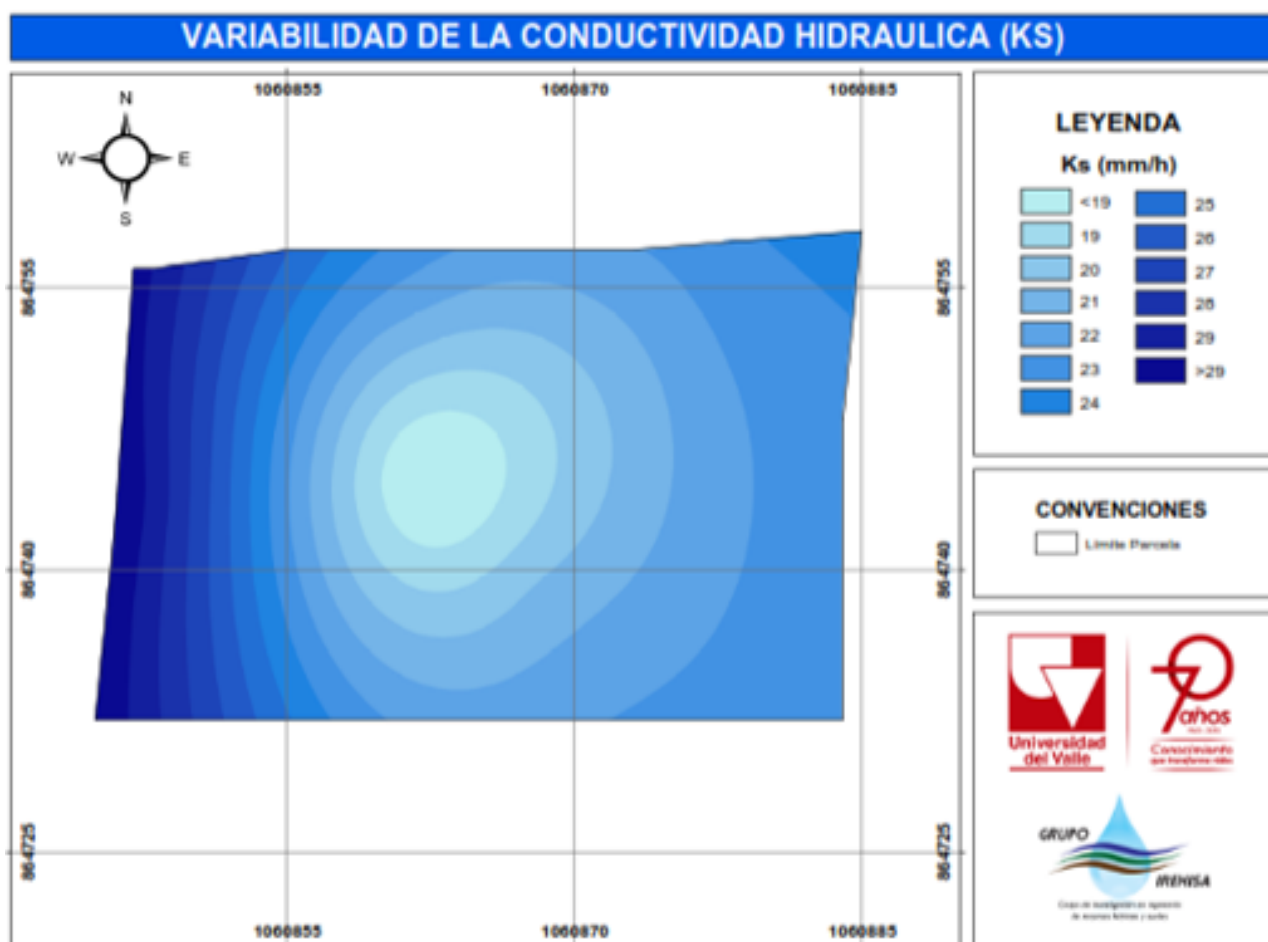


Figura 16. Mapa de distribución espacial para la Conductividad Hidráulica Saturada, en la parcela experimental L.A.S.A. de la Universidad del Valle, 2015.

Los valores más altos para la conductividad hidráulica Fig. 16 se presentaron hacia la parte noreste y este de la parcela experimental, y los valores más bajos se presentan hacia el centro y norte de la parcela lote, con valores entre los 15 mm/h para los más bajos y 30 mm/h para los más altos. Estos valores son debidos a la poca diferencia entre pendientes ya que la parcela experimental está ubicada en la zona de Piedemonte a 976 msnm identificando en la zona solo pocas diferencias entre desniveles de altura.

También es de tener en cuenta que los valores arrojados y la poca variabilidad que se evidencia, arrojada del estudio es consecuente, ya que el área de estudio es muy pequeña con tan solo 1000 m<sup>2</sup>, la cual hace que no exista diferencias significativas entre los valores arrojados, en este caso de Conductividad Hidráulica Saturada donde, en general cabe recalcar que esto sucede otras propiedades de los suelos; además es de considerar que las prácticas de manejo de suelos (cultivos y experimentos), la implementación de estructuras y sistemas de riego en la parcela experimental, han fortalecido el buen manejo, práctica y restauración de suelo lo cual, inciden en que los valores no demuestren mucha dispersión entre ellos y estén asociadas al tipo de suelo y no existan dificultades como efectos de compactación considerables y erosión.

La conductividad hidráulica en este caso se encuentra clasificada en un rango de moderada a moderadamente lenta según (SSDS, 1993). Para Villón, (2007) este valor está influenciado por los valores de densidades aparentes (índices de compactación), la estabilidad de agregados, el contenido de humedad y la porosidad.

En cuanto al análisis, la interpolación Kriging se utilizó el software ArcGis 10.2 en el cual se trabajó con el método de interpolación Kriging Simple el cual arrojó un error cuadrático medio (RMSE) de 4,36 y un RMSE estandarizado de 0,98 con lo se concluye el método de Kriging Simple tuvo un buen ajuste en la interpolación de la variable en este caso Conductividad Hidráulica Saturada ya que este valor es cercano a 1.

Estudios como los de Macías, 2013, reflejan que el estudio de la cartografía para diferentes variables con el fin de generar diagnósticos y evaluaciones con métodos de interpolación como el Kriging generan confiabilidad en el análisis, para posteriormente incentivar el estudio de los sistemas de información geográfica, geoestadística, planificación de territorio, diagnóstico de falencias en el recurso suelo, en la agricultura de precisión y demás campos aplicativos.

## 7. CONCLUSIONES

1. Para el suelo estudiado es de tener en cuenta que posee una buena capacidad de almacenamiento y retención de humedad, gracias al resultado de su buena estabilidad estructural, materia orgánica, porosidad y densidad aparente que evitan que se generen problemas para la evacuación rápida de exceso de agua en el suelo y por el contrario aumentan la proliferación de raíces, conllevando al aumento de la actividad microbiana; también es de considerar que debido a su baja macroporosidad lo vuelve susceptible a la compactación.
2. El suelo de la parcela experimental presenta baja variabilidad espacial en todas las propiedades hidrofísicas analizadas experimentalmente, este comportamiento se debe a una gran cantidad de factores y depende de cada variable que se analice, es específico para cada condición ambiental, de suelo, de uso y de manejo, por lo cual la variabilidad de cada propiedad en este estudio pudo deberse a las diferencias debido al tamaño del área de estudio, al número y manejo de las muestras en campo y laboratorio, muestras analizadas, a la humedad del suelo y a la pendiente.
3. La textura del suelo también tiene una gran influencia en el movimiento del agua a través de él, pues esta determina la humedad que se puede almacenar en un espesor de suelo dada. La textura del suelo estudiado presentada fue franco arcillosa y a pesar de ello, los altos contenidos de materia orgánica le ofrecen buena capacidad de almacenamiento de humedad; sin embargo, la textura determinada puede ser no válida, debido al método de análisis utilizado (Bouyoucos), para suelos con altos contenidos de materia orgánica, presenta un inconveniente en el que sus componentes no logran ser dispersados por los métodos normales o estandarizados de laboratorio, ya aquí la materia orgánica posee propiedades floculantes que evitan total dispersión de las partículas del suelo.
4. Durante la aplicación de software Hydrus-2D para la simulación de la conductividad hidráulica y la curva de retención de humedad se encontró que los datos arrojados para cinco muestras determinadas, se tiene un análisis estadístico paramétrico de las metodologías usadas, donde es importante identificar que los análisis experimentales realizados en campo y laboratorio son menos variables que los que se realizaron con la simulación con el software identificando al modelo de Brooks–Corey como el más variable respecto a los datos arrojados de las otras metodologías usadas identificando que no se cumple con una distribución normal en este caso y el menos variable al modelo de van Genuchten-Mualem donde los datos presentan una distribución normal para las muestras analizadas y la similitud con los datos obtenidos experimentalmente es considerable.

5. Para la simulación y validación de los datos se determinó que el modelo de van Genuchten-Mualem posee una correlación del 60% de los datos y una validez del 36% de confiabilidad con lo cual se dice que el software tiene una aplicación para realizar pronósticos gracias a la correlación obtenida con los datos experimentales. Se identifica que el valor p arrojado por la prueba F muestra valores mayores al nivel de confianza de 0,05 de significancia con lo que se deduce que los datos se asemejan (estadísticamente) con lo que se concluye que no se rechaza la hipótesis nula.
6. Es de considerar que en el análisis del modelo de dependencia de la propiedades de la conductividad hidráulica saturada, el modelo a través del Análisis de Regresión Múltiple, arroja alta dependencia de propiedades, como lo son la humedad del suelo, la textura, la densidad aparente, la estabilidad de agregados, la porosidad, el diámetro promedio de las partículas y los contenidos de materia orgánica, este último es de tener en cuenta ya que este es un valor que no es considerado dentro de la simulación con Hydrus-2D y que tiene gran importancia en la estimación de la conductividad hidráulica, con lo que se concluye que los altos contenidos de materia orgánica presentes en el suelo de estudio inciden en el comportamiento de la conductividad hidráulica saturada provocando cambios en los valores simulados con el software
7. En la representación del comportamiento de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica en la parcela experimental de la universidad del valle se utilizaron los datos arrojados experimentalmente, identificando una variabilidad mínima de los valores obtenidos en el área de estudio y considerando una conductividad entre los rangos moderada a moderadamente lenta la cual está influida por valores de densidades aparentes (índices de compactación), la estabilidad de agregados, el contenido de humedad y la porosidad.
8. Es importante considerar que en el análisis de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica se utilizó el software ArcGis 10.2 el cual proporcionó un diagnóstico de sensibilidad de los datos mediante aplicación de herramientas de interpolación en este caso la interpolación tipo Kriging, identificó un error cuadrático medio estandarizado cercano a 1, lo cual concluye un ajuste conveniente en la interpolación, lo cual indica validez en el estudio y en los datos representados los cuales sirve para generar pronósticos para la realización de investigaciones y aplicaciones en el área de estudio.



*Modelación de la Dinámica del Agua en el Suelo en la Parcela  
Experimental de la Universidad del Valle*



## 8. RECOMENDACIONES

1. Aplicar el estudio del movimiento del agua en el suelo a áreas de extensión más grande con el propósito de diagnosticar irregularidades en el comportamiento de la infiltración y movimiento de agua , con lo cual se busca aplicar en las investigaciones ya sea en el diseño de sistemas productivos, sistemas de riego, aplicación en las aguas subterráneas, identificando todas las propiedades hidrofísicas que inciden en el comportamiento del agua para así generar menores errores de investigación y gastos en los procesos de desarrollo.
2. Utilizar, analizar y aplicar el paquete de software Hydrus-2D el cual brinda en su haber la posibilidad de determinar mediante la entrada de datos previos los valores y el comportamiento del agua en el suelo para un determinado tipo de suelo y área específica de donde estos sirve como instrumento para el estudio de la ciencia del suelo y de fenómenos como la erosión, la compactación, las sequias y demás campos de estudio.
3. Realizar la validación y simulación con el paquete del software Hydrus-2D en áreas más grandes y con mayor recolección de datos para un análisis detallado con el fin de diagnosticar situaciones con el fin de generar soluciones entorno a problemáticas relacionadas al comportamiento del recurso hídrico, su disponibilidad y como afecta en la porción de suelo analizada.
4. Validar y calibrar el software Hydrus-2D para el Valle del Cauca para un mayor rendimiento del modelo asociado al departamento para así determinar un trabajo de agricultura de precisión en la zona de estudio generando datos confiables propios para la zona, aplicándolos para el diseño de múltiples herramientas en áreas como edafología, las aguas subterránea y la ingeniería de riegos.
5. Implementar, desarrollar y aplicar el estudio de las otras funciones del paquete del software Hydrus-2D, como lo son el transporte de solutos en diferentes tipos de suelo y áreas de aplicación, distribución del movimiento tanto de agua como de solutos en las raíces a través de diferentes metodologías ofrecidas por el software entre otras, con el fin de considerarlo como una herramienta confiable y optima en su utilización.

6. Aplicar y fomentar la utilización de los paquetes de sistemas información geográfica tales con el ArcGis, ya que estos ayudan en la visualización del comportamiento de las propiedades y variables en este caso del comportamiento de la conductividad hidráulica saturada identificando la variabilidad que se tiene de esta frente al espacio de investigación y cómo influye el tamaño de este, la pendiente y la condiciones propias de este.

## 9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Continuando con la investigación empezada con este trabajo de grado, se proponen las siguientes líneas futuras de estudio que pueden complementar los resultados obtenidos:

- Modelación de la dinámica de los lixiviados de Nitratos en cultivos de Albahaca y Stevia en condiciones controladas
- Determinación de la capacidad de regulación hídrica de un Typic Hapludand mediante las curvas de retención de humedad y la modelación de las propiedades hidrofísicas.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E. y Martínez, E. (2003). *Sistema de labranza y productividad de los suelos*. In: Acevedo, E. *Sustentabilidad en cultivos anuales*. Cero Labranza manejo de rastrojos. Serie Ciencias Agronómicas N° 8. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile Santiago. pp 184. Santiago de Chile.
- Amador, A., Wang, Y., Savin, M. & Görres, J. (2000). *Fine-scale spatial variability of physical and biological soil properties in Kingston*. Geoderma, (98): 83-94. Rode Island.
- Ankey M., Kaspar, T. & Horton, R. (1988). *Design for an automated tension infiltrometer*. Soil Sci. Soc. Am. J, (52), 89-96.
- Arbat, G., Puig-Bargues, J., Barragan, J., J. Bonany, J., Ramirez de Cartagena, F., 2008. *Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modelling approach*, Biosystems Eng. 100(2): 286-296.
- Arcila, G. Y López, J. (2012). *Inoculación con endomicorriza en caña de azúcar para reducir la lámina de riego*. Trabajo de grado. Escuela de Recursos naturales y del ambiente EIDENAR. Universidad del Valle. pp.39. Santiago de Cali.
- Arias, A. (2001). *Suelos Tropicales*. EUNED. (1): 55 – 62p. San José. Costa Rica.
- Arshad, M., Lowery, B. & Grossman, B. (1996). *Physical tests for monitoring soil quality*. In: J.W. Doran and A.J. Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. SSSA, Madison, WI. (49): 123- 142.
- Baver, L., Gardner, W., & Gardner, W. (1973). *Física de suelos. En español*. U.T.E.H.A. (1), pp. 529. México.
- Banco Mundial. (BM). (2007). *Enviromental Priorities and Poverly Reduction: A Country Enviromental Analysis for Colombia*. Banco Mundial. Washington: (Sanchez-Triana, Ahmed & Awe) editors.
- Bernal, A. en Martínez, M., Martínez, S., & Vacchiano (2000). *La investigación en marketing*. Editorial AEDEMO. Pp.584. Barcelona.
- Bezerra de Oliveira, L. (1968). *Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em mostras de solo com estrutura indeformada*. Pesquisa Agrop. Bras. (3) ,197-200.
- Blaya, S. & García, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi-Prensa Libros.

Blake, G., Hartge, K. (1986). *Bulk Density*. In: A. Klute, ed., *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*: Agronomy Monograph no. 9. ASA and SSSA, (2). 363-375. Madison, WI.

Bohn, H. L., McNeal, B. L. & O'Connor, G. A. (1993). *Química del suelo*. pp. 370 México: Limusa.

Brady, N. (1984). *The nature and properties of soils*. New York: MacMillan Publishing Company.

Brito, G., Arrieché, E., Bisbal, N., Alfonzo, M., Navas, N., Gómez, Y., Yáñez, P. (2004). *Manual de métodos y procedimientos de referencia (Análisis de suelo para diagnóstico de fertilidad)* 2da. Versión. INIA. Pp. 70 – 85. Venezuela.

Brooks, R & Corey, A. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, CO. pp. 27.

Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., Heibloem, M. (1988). *Irrigation water management: Irrigation methods*. Training manual no 5. FAO Land and water development division, FAO, Rome.

Brunel, N & Seguel, O. (2011). *Efectos De La Erosión En Las Propiedades Del Suelo*. Agro sur. 39(1): 1-12. Consultado el 17 Mayo 2015. Disponible en: [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-88022011000100001&lng=es&nrm=iso](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-88022011000100001&lng=es&nrm=iso). ISSN 0304-8802.

Burdine, N. (1953). *Relative permeability calculations from pore size distribution data*. Journal of Petroleum Technology, 5(03), 71-78.

Buol, S. W.; Hole, F. D.; Mccracken, R. J. & Southard. R. J. (1997). *Soil Genesis and Classification*. (4). pp. 527. Iowa: Ed. Iowa State University Press.

Calle, K., & Proaño, J. (2003). *Determinación de la Curva de Retención de Humedad para los principales tipos de suelo de la Península de Santa Elena, Provincia del Guayas* (Doctoral dissertation, Tesis de Grado. Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil–Ecuador).

Cambardella, C., Moorman T., Parkin, T. & Karlen, L. (1994), *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. Soil Science Society of America Journal, 58, 1501-1511.

Carrera, M. A. (2012). *Efectos de diferentes usos del territorio en las características edáficas: Influencia de una vía pecuaria en las funciones de regulación del suelo*. Universidad Autónoma de Madrid-universidad complutense de Madrid. Madrid.

Castrignanò, A, Giugliarini, L. Risaliti, L. & Martinelli, N. (2000). *Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics*. Geoderma, 97: 39-60.

Castro, H. (1998). *Fundamentos para el Conocimiento y Manejo de Suelos Agrícolas*. Manual Técnico. Editorial Produmedios. Pp. 360. Tunja.

Cely, G. (2010). *Determinación de parámetros de riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de riego del alto Chicamocha*. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Facultad De Agronomía Escuela De Posgrados, Maestría En Ciencias Agrarias. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2743/1/790551.2010.pdf>. Consultado en 5 de mayo de 2015.

Centro de Estudios para Conservación Integral de la Ladera (CECIL. (1998). *Manejo integral de cultivos en suelos bajo riegos*. Área de manejo de aguas—Curso básico. Instituto Nacional de Adecuación de Tierras y Cooperación técnica por el gobierno del Japón. Pp. 136. Fusagasuga.

Cheng, L., Evett & B. Jack. (1984). *Soil properties: testing, measurement and evaluation*. University of North Carolina and Chalotte. Pp. 448.

Cornelis, W. M., Ronsyn, J., Van Meirvenne, M., & Hartmann, R. (2001). *Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve*. Soil Science Society of America Journal, 65(3), 638-648.

Cortés, A. & Malagón, D. (1984). *Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples*. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. Pp. 360.

Dagnino, J. (2014). *Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson*. Rev Chil Anest, (43): 150-153. Recuperado de: [http://www.sachile.cl/upfiles/revistas/54e63a1a778ff\\_15\\_correlacion-2-2014\\_edit.pdf](http://www.sachile.cl/upfiles/revistas/54e63a1a778ff_15_correlacion-2-2014_edit.pdf). Consultado en: abril 14 de 2015.

Dahiya, R., J. Ingwersen, and T. Streck. (2007). *The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling*. Soil and Tillage Res, 96(1), 52-63.

De Groot, R., Van Der Perk, J., Chiesura, A., & Marguliew, S. (2000). Ecological functions and socio-economic values of critical natural capital as a measure for ecological Integrity and environmental health. In: Crabbe, P., Holland, A., Ryszkowski, L., Westra, L. (Eds.), *Implementing Ecological Integrity: Restoring Regional and Global Environmental and Human Health*. NATO-Science Series, IV. (1), 191–214. Dordrecht/Boston/London: Earth and Environmental Sciences, Kluwer Academic. Publishers.

Dokuchaev, V. (1886.). *Breve descripción histórica y el análisis crítico de las clasificaciones más importantes del suelo*. Trav. Soc. Nat. (10), 64-67. San Petersburgo.

Dregne, H. (1992). *Erosion and soil productivity in Asia*. J. Soil and Water. Cons. 47: 8-13.

ESRI. ArcGIS Resources. (2014). *El Nuevo ArcGIS 10.1*. Recuperado de: <http://resources.arcgis.com/es/help/gettingstarted/articles/026n00000012000000.htm>  
Consultado el 7/mayo/2014.

Forsythe, W. (1975). *Manual de laboratorio de Física de Suelos*. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). pp. 212 . Costa Rica.

Fassbender, H. W. (1982). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura (IICA). San Jose. pp. 328 . Costa Rica.

Florentino, A. (1994). *Guía sobre índices físicos de suelo. Valores críticos. Curso de Física de Suelos*. Postgrado en Tecnología de Suelo. ETS de Ingenieros Agrónomos. España. Universidad Politécnica de Madrid.

Galiano, F. (1991). *Capacidad de intercambio catiónico y aniónico, bases de cambio y saturaciones. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. SCCS. 164-185. Bogotá,D.C.

Gee, G., & Ward, A. (1999). *Innovations in two-phase measurements of soil hydraulic properties. In: van Genuchten, M.Th.g Leij, FJ. y Wu, L. (Eds.) Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. (1), pp.241-269. Riverside, California.

Givi, J. Prasher, S. Patel, R. (2004). *Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point*. Agricultural Water Management. (70): 83 – 96.

Gollany, H., Schumacher, T., Lindstrom, M., Evenson, P., Lemme, G. (1992). *Topsoil depth and desurfacing effects on properties and productivity of a Typic Argiustoll*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(1): 220-225.

González, A.& García, J. (1987). Retención de agua en Andosoles del Departamento del Cauca, Colombia. S. A. *Suelos Ecuatoriales*. 17(2): 56-63.

González, C. & Ospina, J. (2011). *Desarrollo y perspectiva de la Ingeniería Agrícola*. Ingeniería e Investigación. Universidad Nacional de Colombia. (47): 32-56.

Goode, D. (1999). *Age, double porosity, and simple reaction modifications for the MOC3D ground-water transport model: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4041*, pp. 34 . Reston, VA.

Hanks, R. J. & Ashcroft, G. L. (1980). *Applied soil physics: Soil water and temperature applications*. pp. 159. Berlín: Springer-Verlag.

Hartmann, R. (2000). *Soil Physics. Lecture notes, Dept of Soil Management and Soil Care*. Ghent University, Belgium.

Hawsad N. W., Liube, B., Boast, C. W., Rao, P. S. C., Klavinskob, E. J. & Franzmeierb, D. P. (2004). *Spatial Variability and Measurement Scale of Infiltration Rate on an Agricultural Landscape*. Soil Science Society of America. (68), 1818- 1826.

Henninger , D. P. (1976). Surface soil moisture within a watershed: Variations, factors influencing and relationships to surface runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (40), 773-776.

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. pp. 771 . San Diego. U.S.A. Academic Press.

Hills, T.C. & Reynolds, S.G. (1969). *Ejemplos de variabilidad de la humedad del suelo en las áreas seleccionadas y plots de diferentes tamaños*. *J Hydro.* (8), 27-47.

Hoyos, P. (1999). *Impacto de diferentes usos y manejos del suelo en los cambios químicos, físicos y biológicos de la Altillanura bien drenada*. Proyecto interinstitucional CIATCORPOICA-UNILLANOS. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. pp. 48. Bogotá DC. Colombia.

Hubble, J.M. & Sisson, J.B. (1996). *Portable tensiometer use in deep boreholes*. *Soil Sci.* (161), 376-381.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. (IDEAM). (2010). *Estudio Nacional del Agua*. IDEAM. Bogotá. Documento disponible en línea en: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/020962/Estudio%20Nacional%20del%20agua.pdf>. Consultado el 24/Agosto/2014.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, & CORPOICA Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Bogotá, D.C.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (1997). *Guía metodológica para la formulación del plan de ordenamiento territorial municipal*. IGAC. pp. 186. Bogotá D.C.



Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC.) (1977). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (Departamento de Cundinamarca)*. IGAC. pp. 513. Bogotá. D.C.

Ingelmo, S. & Cuadrado, S. (1986). El agua y el medio físico del suelo. *Temas monográficos No. 18. Centro de Edafología y Biología Aplicada*. pp.102. Salamanca.

Izaurrealde, R.C., Malhi, S.S., Nyborg, M., Solberg, E.D & Quiroga, M.C. (2006). *Crop performance and soil properties in two artificially eroded soil in North-Central Alberta*. Agron. J. 98(5): 1298-1311.

Jagadamma, S., Lal, R., Rimal, B. (2009). *Effects of topsoil depth and soil amendments on corn yield and properties of two Alfisols in central Ohio*. J. Soil and Water Cons. 64(1): 70-80.

Jaramillo, D., Parra, L., González, H., (1994). *El Recurso Suelo en Colombia: Distribución y Evaluación*. Universidad Nacional de Colombia, ICNE. Medellín. 88 p.

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.

Jaramillo, D., González, H. & F. Álvarez. (2008), *Variabilidad espacial de algunas propiedades físicomecánicas de suelos de textura pesada*. Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 3(2): 10-19.

Jaramillo, D. (2008a). *Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia)*. Revista facultad Nacional de Agronomía Medellín, 61(2): 4588-4599.

Jaramillo, D. (2011). *El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad*. Universidad Nacional de Colombia. Pp.553. Medellín.

Jaramillo, D. (2012). *Variabilidad Espacial del suelo: Bases para su estudio*. Revista de la Facultad de Ciencias. 1(1), 73-87.

Jaramillo, D., Sadeghian, S. & Lince, L. (2012). *Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia*. Informe de año sabático. Universidad Nacional de Colombia. CENICAFÉ. 71 p. Medellín

Juárez, E. (2005). *Mecánica de suelos. Tomo 3, Flujo de Agua en Suelos*. Editorial Limusa. México, D.F. (2): 293 – 307.

Juárez, S., Sánchez, J., Sánchez, A. (2006). *Química de Suelo y Medio Ambiente*. Universidad de Alicante. España. 125-134p.

Jury, W. A.; Gardner, W.R and Gardner, W. H. (1991). *Soil physics*. 5ª.pp.328. New York: Ed. John Wiley and Sons, Inc.

Kool, J. & Parker, J. (1987). *Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties*. Water Resour. Res., 23(1): 105-114.

Kosugi K. (1996). *Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties*, Water Resour. Res., 32(9), 2697-2703.

Kobayashi, K, Salam, M. (2000). *Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components*. Agronomy. (92): 345 – 352.

Kramer, P. J. (1974). *Relaciones hídricas de suelo y plantas*. pp 538. México: la. ed. española. Edutex S.A.

Krull, E., Skjemstad, J., Baldock, J. (2004). *Functions of soil organic matter and the effect on soil properties*. Grains Research & Development Corporation report Proyect No CSO 00029.

Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Universidad de Arizona. Thomson Learning. 38-53p.

López, A. J. (2009). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, mineralogía y química, Universidad de Sevilla. 15-17p

López, M., Oliveira, J., & Afif, E. (2006). *Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado*. Universidad de Oviedo. Asturias. 60 – 75p.

Lozano, J., Madero, E., Tafur, H., Herrera, O., & Amézquita, E. (2005). *La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el Valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA*. Acta Agronómica, 54(3).

Macías, J. (2013). *Generación de Cartografía Continua para Variables Climáticas en Castilla y León mediante Técnicas De Interpolación Espacial*. Universidad de León Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas, Ingeniería Técnica en Topografía. Tesis. 8-11p.

Mair, A. & Fares, A. (2011). *Comparison of Rainfall Interpolation Methods in a Mountainous Region of a Tropical Island*. Journal of Hydrologic Engineering, (16): 371-383

Malagón, D., Pulido, C., & Chamorro, R. (1995). *Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. IGAC. pp. 632. Bogotá.

Mallarino, A., Wittry, D. & Klatt, J. (2001). *Using the Iowa phosphorus index and variable-rate technology for effective agronomic and environmental phosphorus management*. In: The

Integrated Crop Management Conf. Proceedings. Ames, IA. Iowa State Univ. Extensión. pp. 151-158.

Martínez H., Fuentes E., & Acevedo H., (2008). *Carbono Orgánico y Propiedades Del Suelo*. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8(1), 68-96. Recuperado en 22 de febrero de 2015, de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-27912008000100006&lng=es&tng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912008000100006&lng=es&tng=es). 10.4067/S0718-27912008000100006.

Mbagwu, J., Lal. R., Scott, T. (1984). *Effects of artificial desurfacing on Alfisols and Ultisols in southern Nigeria: II. Changes in Soil Physical Properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 834-838.

Mejía, L. (1983). Pedología descriptiva. *Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF)*. pp.176. Bogotá, D.C.

Miller, E., & Salehzadeh, A. (1993). Stripper fot Bubble-Free Tensiometry.J. *Soil.Sci.Soc.Am* (57), 1470-1473.

Montenegro, H., & Malagón, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. pp. 813. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín (IGAC).

Moore, I.D.; Burch, G.J.; Mackenzie, D. (1988). Topographic effects on the distribution of surface water and the location of ephemeral gullies. *Trans. Am. Sac. Agric. Eng.* (31), 1098-1107

Motta, B., Rodríguez, C. & Montenegro, H. (1990). *Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos*. (5) pp. 502. Bogotá: IGAC.

Moutonnet, P. & Schmidt, F. (1985). *Variabilité spatiale de la densité apparente et de l'humidité volumique d'un sol alluvial*. Bulletin du G.F.H.N. (17), 53-63.

Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. *Water Resources Research*. (12), 513-522.

Nemes, A; Schaap, M; Wosten, J. (2002). *Functional Evaluation of PedotransferFunctions Derived from Different Scales of Data Collection*. Soil Science Society of America. 67: 1093 – 1102p.

Núñez, J. (2000). *Fundamentos de Edafología*. Tercera edición. Editorial EUNED. San José. Costa Rica, (3): 121 – 129.

Obando, F., Villegas, A., Betancur, J. & Echeverri, L. (2006), *Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central*

colombiana. Revista facultad Nacional de Agronomía Medellín, 59(1): 3217-3235.

Ovalles, F. (1992), *Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad*. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales. Serie B.

Oficina de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (OAS). (1997). *Estudio de Diagnostico de la Cuenca del Rio San Juan y Lineamientos del Plan de Acción*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, República de Costa Rica. Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE). República de Nicaragua, Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA). PNUMA - División de Aguas Continentales Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente. OEA - Oficina de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente Organización de los Estados Americanos. Washington D.C. Disponible en: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea05s/ch09.htm>. Consultado el 12 de febrero de 2015.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2000). *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de tierras y agua de la FAO, (8).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: Deposito de documentos de la FAO*. Producido por el Departamento de Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s06.htm>. Consultado el 24 /febrero/2014.

Pérez, M.; Rojas, J. & Ordóñez, C. (2010). *Desarrollo Sostenible: Principios, Aplicaciones y Lineamientos de Política para Colombia*. Universidad de Valle. Pp.44. Cali, Colombia.

Parra, M., Fernández, R., Navarro, C., & Arquero, O. (2003). *Los Suelos y la Fertilización del Olivar Cultivado en Zonas Calcáreas*. Editorial Mundi – Prensa. 35 – 48p. Madrid. España.

Paz-González, A., Vieira, S. & Taboada, M. (2000). *The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon*. Geoderma, (97): 273-292.

Peña, J. (2012). *Evaluación de los Efectos En las Propiedades Hidrofísicas de un Suelo Inceptisol y en el Desarrollo de un Cultivo de Caña de Azúcar (Saccharum officinarum L.) por la Aplicación de Biosólidos Provenientes de la PTAR Cañaveralejo de Cali*. Revista EIDENAR. (11), Cali, Colombia: Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente.

Pla, I. (1977). *Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales*. Universidad Central de Venezuela. Maracay. Pp. 111.

Pikul J., Allmaras R. (1986). *Physical and chemical properties of a Haploxeroll after fifty years of residuemanagement*. Soil Sci. Soc. Am. J. (50): 214-219.

Porta, J., López, M. & Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. pp. 807. Madrid, España.

Porta, J., López, M. & Roquero, C. (2011). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. (2): 337-379. Madrid, España.

Rawls, W. & Brakensiek, D. (1985). *Prediction of soil water properties for hydrologic modeling*. Pp 293-299. In: Jones, E.B.; Ward, T.J. Watershed management in the eighties. Denver, Co: ASCE, 1985. Recuperado de: [www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm](http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm). Consultado el 12 de febrero 2015.

Rawls, W., Pachepsky, Y., Ritchie, J., Sobecki, T., Bloodworth. (2003). *Effect of soil organic carbon on soil water retention through hydrus – 1D*. Geoderma. (62): 1– 16.

Requena, M. (2005). *El desarrollo de las marcas gestionadas por la distribución en mercados de alimentación y droguería en España (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Análisis de Regresión Múltiple*. Pp: 126. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid.

Restrepo, W. (2013). *Dinámica de las Propiedades Físicas y Químicas Asociadas a la Regulación Hídrica de un Suelo Andisol Bajo un Sistema de Producción Agrícola Ecológico en la Vereda Centella, Dagua, Valle del Cauca*. Universidad del Valle. Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA). Cali.

Reynolds, S. (1970b). *The gravimetric method of soil moisture determination, III: An examination of factors influencing soil moisture variability*. J. Hydrol. (11): 288-300.

Reynolds, W. D. & Elrick, D. E. (1985). *Medición in situ de conductividad hidráulica campo-saturado, sortividad y  $\alpha$ -parámetro  $r$  utilizando el permeámetro de Guelph*. Soli Sci, (140): 292-302.

Reynolds, W., Elrick, D., Youngs, E., Amoozegar, A., Booltink, H., Bouma, J. (2002). *Saturated and field-saturated water flow parameters. In: Methods of Soil Analysis, Part 4—Physical Methods, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds)*. Soil Science Society of America. Madison, USA. p. 797-878.

Rhoton, F. (2000). *Influence of time on soil response to tillage practices*. Soil Sci. Soc. Am. J. (64): 700 – 709.

Richards, L.A. (1931). *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics. (1): 318-333.

Ringrose-Voase, A.J. & Bullock, P. (1984). *The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs*. J Soil Sci. (35): 673-684.

Ritsema, C., Steenhuis, T. M., Parlange, J. Y. & Dekker, L. W. (1996). *Predicted and observed finger diameters in field soils*. Geoderma. (70): 185-196.

Rubio, C., & Llorens, P. (2003). *Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos (cuencas experimentales de Vallcebre, Alt Llobregat)*. Estudio de la zona no saturada del suelo, (6): 137-142.

Rubio, Carles. (2005). *Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta*. PhD Tesis, Universitat Autònoma de Barcelona.

Rubio, C., Llorens, P. & Van Genuchten, M. (2005). *Modelización del Flujo Transitorio en Suelos Franco-Limosos utilizando Hydrus-1D*. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo (7).

Sánchez, P. (1981). *Suelos del trópico: características y manejo. en español*. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). (1), pp. 534. Costa Rica.

Santesmases, M. (1998). *Marketing. Conceptos y estrategias*. Editorial: Ediciones Pirámide. Pp. 237. Madrid. España.

Schaap, M, Leij, F. (2001). *Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model*. Soil Science Society of America. (64): 843 – 851.

Schaap, M. (1999). *Rosetta version 1.0 bajo Windows*. 1999. Disponible en: [www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm](http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm). Consultado el 12 de febrero de 2015.

Schofield, R. K. (1935). *The pF of the water in soil*, Trans. Int. Congr. Soil Sci. (3), 38-48.

Scott, P., Farquhar, G. & Kouwen, N. (1983). *Hysteresis effects on net infiltration*, Advances in Infiltration. Am. Soc. Agri. Eng. Publ. 11-83, p. 163-170p. St. Joseph, Mich.

Simunek, J., & Van Genuchten, M. (1994). *El Código CHAIN\_2D para Simulación Bidimensional movimiento del agua, Calor, y múltiples solutos en variablemente saturado de medios porosos, Versión 1.1*. Informe de Investigación N ° 136. Riverside, California: Laboratorio de Salinidad, USDA, ARS.

Simunek, J., & Suárez, D. (1994). *El Código SOILCO2 de Simulación Unidimensional producción de dióxido de carbono y el transporte en variablemente saturado Medios porosos, Versión 1.2*. Informe de Investigación N ° 127. Riverside, California: Laboratorio de Salinidad EE.UU.USDA-ARS.

Simunek, J., Van Genuchten, M., Sejna, M., & TORI, N. (1997). *USDA-ARS U.S. Salinity Laboratory*. Riverside, California.

Simunek, J., Huang, K., Sejna, M. Y Van Genuchten, M.TH. (1998<sup>a</sup>). *The HYDRUS-2D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variable-saturated media*. Version 1.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, pp.162. Golden, Colorado: Colorado School of Mines.

Šimunek, J., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2011). *Technical Manual version 2: Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. Vadose Zone Journal. PC-Progress, Prague, Czech Republic. 1(2): 7-30.

SSDS. (1993). *Soil survey manual. Handbook No. 18*. United States Department of Agriculture (USDA) pp.437. Washington D.C.

SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). (1995). *Information Manual*. Soil Survey Investigations. Report N° 45. Version 1.0. USDA. pp. 305. Lincoln.

Stephens, D.B. (1996). *Vadose zone hydrology*. pp. 347. Florida: Lewis Publishers.

Tafur, H. (2014a). *Metodología de Determinación de Densidad Aparente en Húmedo*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Palmira.

Tafur, H. (2014b). *Dinámica o Movimiento del Agua en Suelos no Saturados*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Palmira.

United States Department of Agriculture. (USDA). (1999a). *Claves para la taxonomía de suelos*. Servicio de Conservación de los Recursos Naturales.

United States Department of Agriculture. (USDA) (1999). *Obtenido de Agricultural Research Service. UNSODA MODEL*. Recuperado de:  
<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8967>. Consultado el 5/Mayo/2014.



United States Department of Agriculture (USDA) (2005). *Obtenido de Agricultural Research Service - HYDRUS 2D*. Recuperado de:

<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8921>. Consultado en: 5/mayo/2014.

United States Department of Agriculture (USDA) (2012). *Agricultural Research Service. Software*. Recuperado de:

<http://www.ars.usda.gov/services/software/software.htm?modecode=53-10-20-00>

Consultado el 5/Mayo/ 2014.

United States Department of Agriculture (USDA) (2014). *Obtenido de Natural Resources Conservation Service - ROSETTA-NRCS*. Recuperado de:

<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/drainage/?cid=stelprdb1045315>. Consultado el 5/mayo/2014.

U.S. Geological Survey (USGS), (2004). *Science for a Changing World. Obtenido de Water Resources Applications Software. MOC3D*. Recuperado de:

[http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/moc3d/man\\_wrdapp.html](http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/moc3d/man_wrdapp.html). Consultado: 5/Mayo/2014.

Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (UNAL), (2015). *Seminario de Investigación*. Recuperado de

<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/odontologia/2002890/lecciones/preubat/pruebat.htm>. Consultado en: mayo 23 de 2015.

Utomo, W., & Dexter, A. (1982). *Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil*. Journal of Soil. Sci. (33): 623-627.

Van Beers, W.J. (1958). *The auger-hole method. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Bull 1*. H. Veenman & Zonen, Wageningen, The Netherlands, 32 p.

Van Beers, W.J. (1976). *El método de agujero barrenado. Instituto Internacional para la Recuperación de Tierras y Mejoras (ILRI)*. (1), pp 24. Países Bajos.

Van Genuchten, M.T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. (44): 892–898.

Van Genuchten, M., Leij, F. & Yates, S. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. EPA/600/21/2-91/0,65,Ada. Riverside, CA: U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS.

Vilenskii, D. (1957). *Translated from Russian by Israel Program for Scientific Translation*. Soil Science. Jerusalem.



Vogel, T. & Císlerová, M. (1988). *On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve*, *Transport in Porous Media*. (3): 1-15.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*. *Soil science*, 37(1): 29-38.

Wang, D., Yates, S., & Earnst, F. (1998). *Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry and tensiometers*. *Sail Sci. Soc, Am, J*, (62), 318-325.

Webster, R. & Oliver, M. (2007), *Geostatistics for environmental scientists*. 2nd ed. John Wiley& Sons, Ltd. 315 p. England.

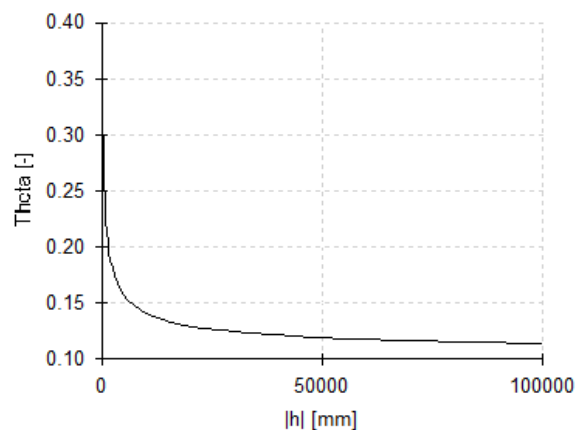
Worthen, E. L. (1949). *Suelos agrícolas: Su conservación y fertilización*. U.T.E.H.A. pp. 463. México.

Yoder, R. E. (1936). *A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses*.(28), 337-351. *J. Am. Soc. Agron*

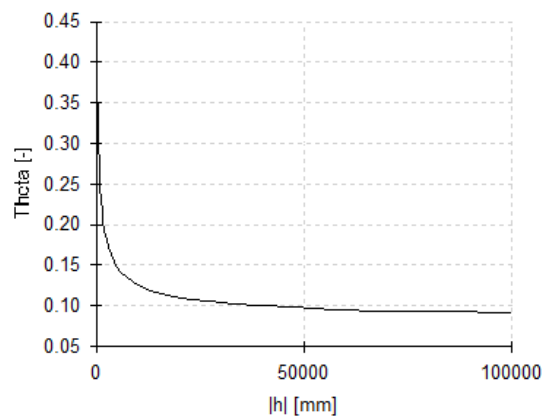
Zuñiga, O., Osorio, J., & Cuero, R. (2009). *Alternativas en el manejo sostenible de los suelos: un enfoque analítico y sintético*. Grupo de investigación en ciencias ambientales y de la tierra, ILAMA. Cali. Colombia: Universidad del Valle.

## 11. ANEXOS

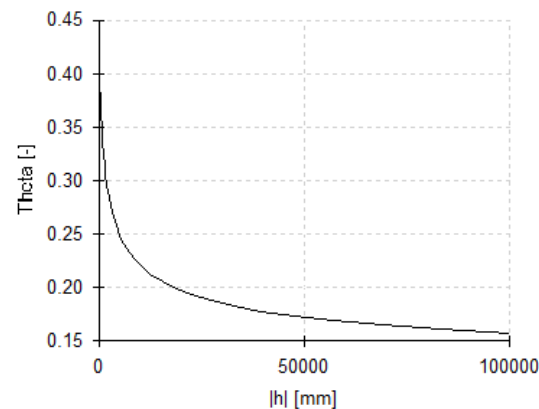
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



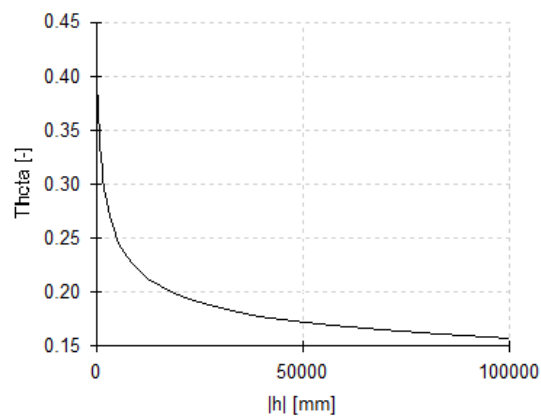
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

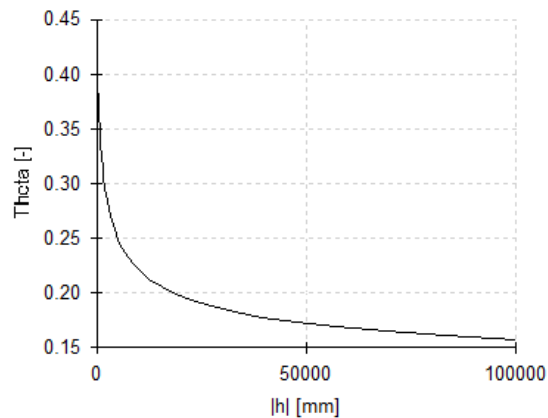
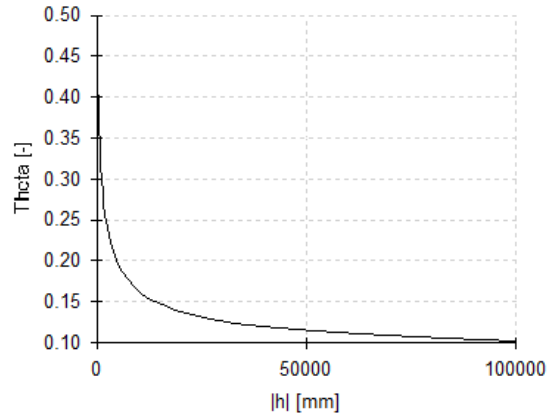
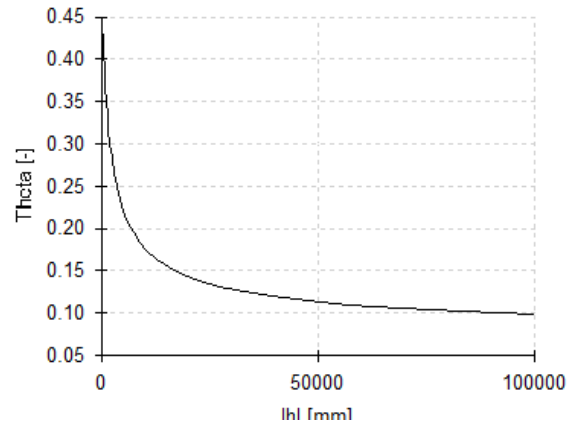


Figura 17. Curvas de retención de humedad simulada en Hydrus 2D para cinco tipos de textura (franco arcillosos arenoso, franco, franco arcillosos respectivamente) a una profundidad de 30cm con el modelo de van Genuchten (1980) - Mualem (1976).

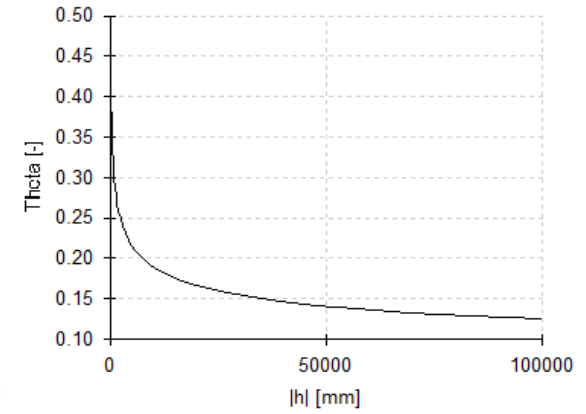
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



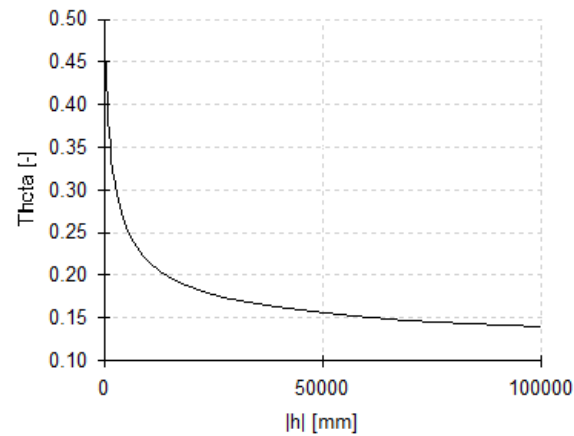
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

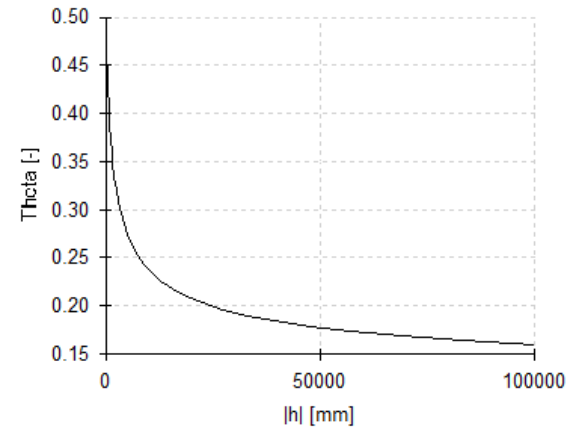
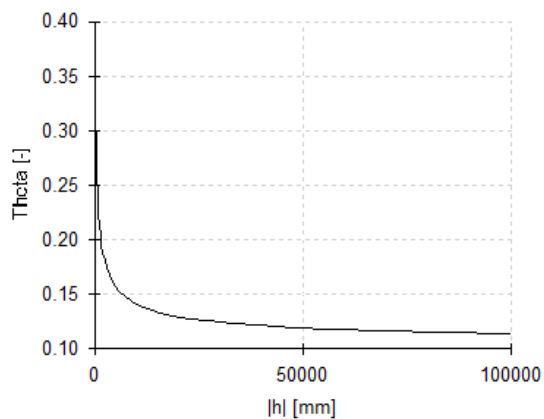
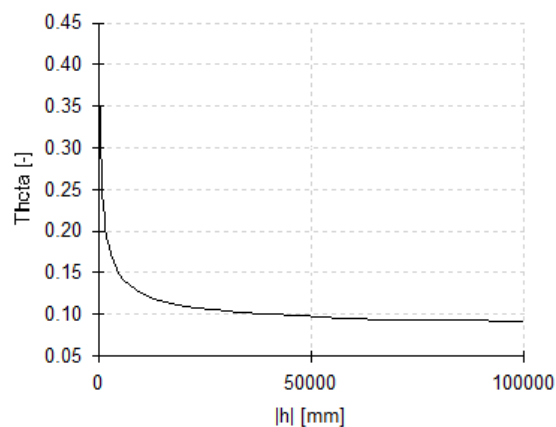


Figura 18. Curvas de retención de humedad simulada en Hydrus 2D para cinco tipos de textura (franco arcilloso arenoso, franco, franco arcilloso respectivamente a una profundidad de 30cm con el modelo de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) usando redes neuronales de Rosetta-lite.

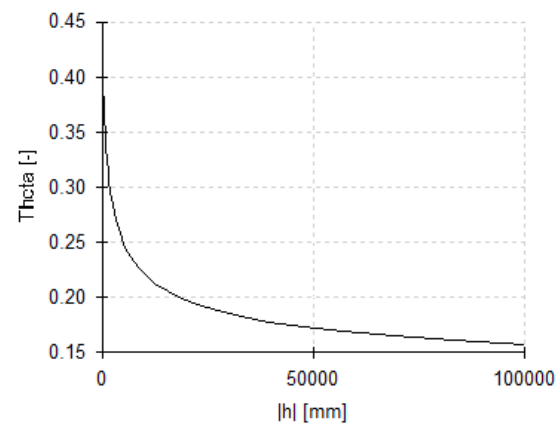
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



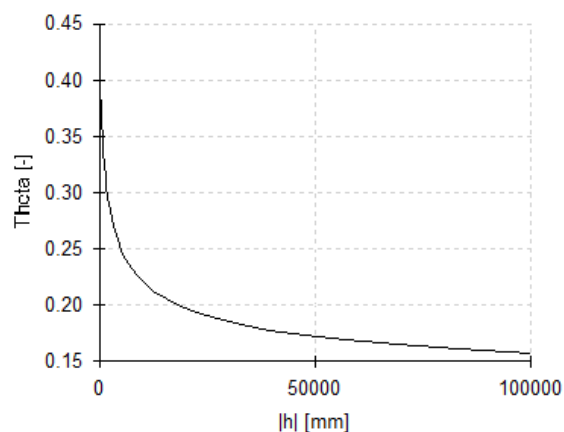
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

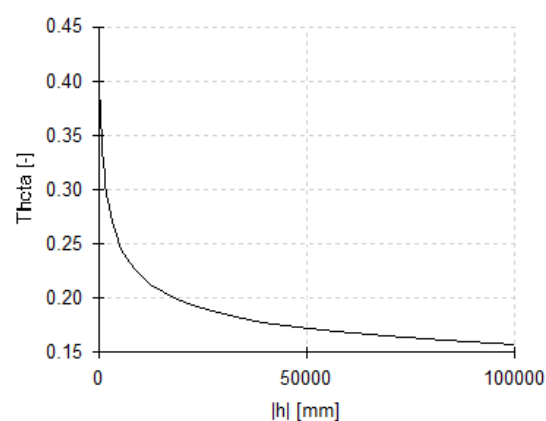
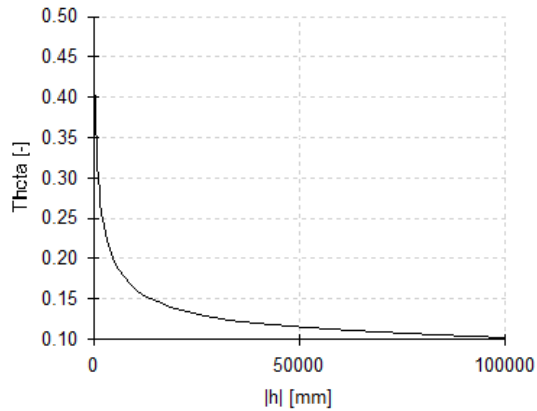
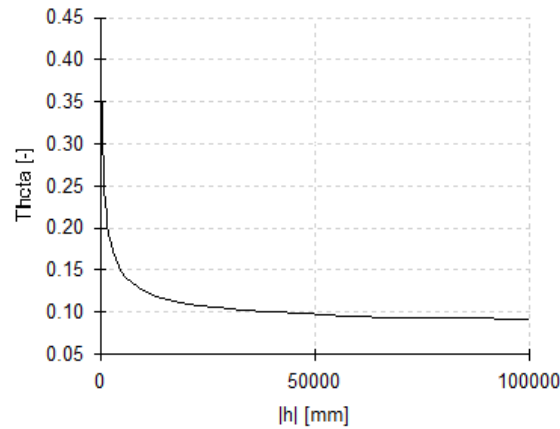


Figura 19. Curvas de retención de humedad simulada en Hydrus-2D para cinco tipos de textura (franco arcillosos arenoso, franco, franco arcillosos respectivamente a una profundidad de 30cm con el modelo Modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976).

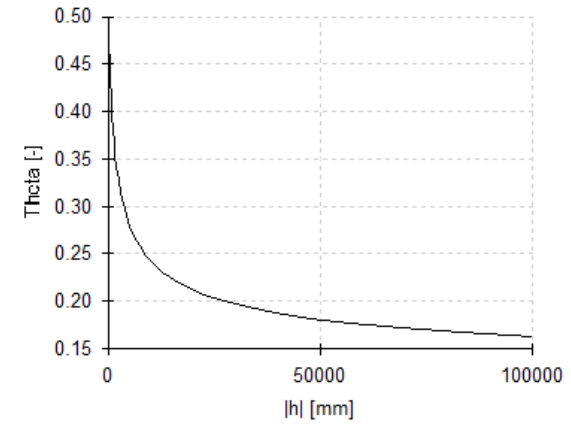
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



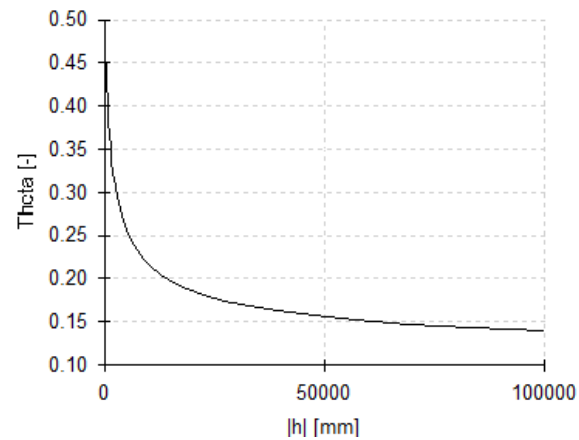
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

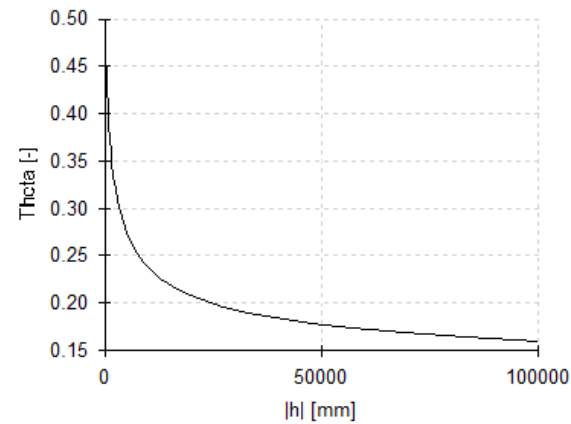
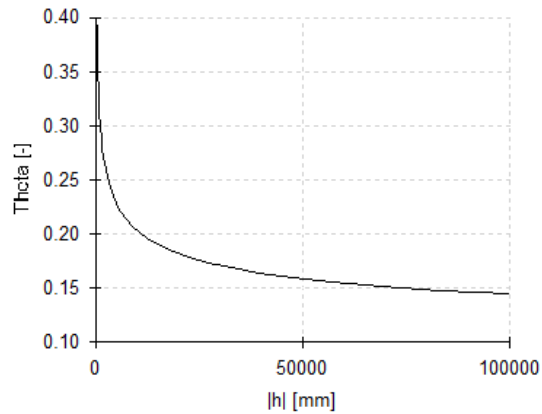
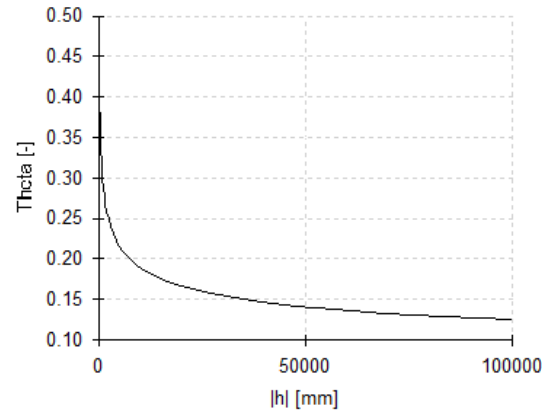


Figura 20. Curvas de retención de humedad simulada en Hydrus-2D para cinco tipos de textura (franco arcillosos arenoso, franco, franco arcillosos respectivamente a una profundidad de 30cm con el modelo Modificado de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) usando redes neuronales de Rosetta –lite.

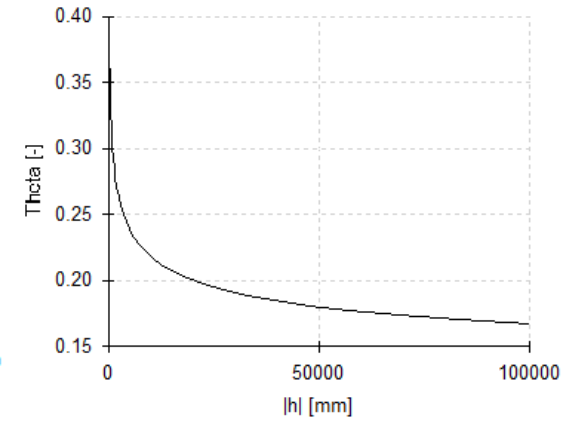
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



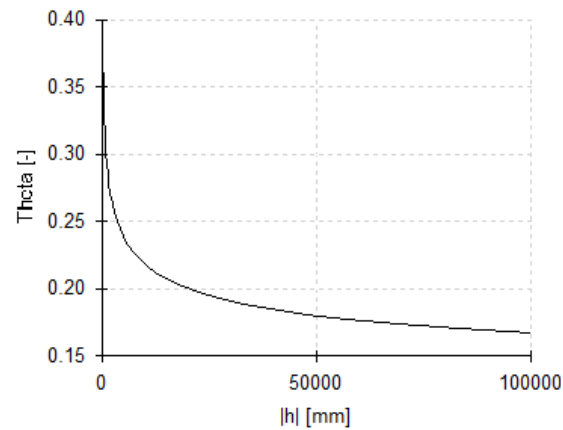
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

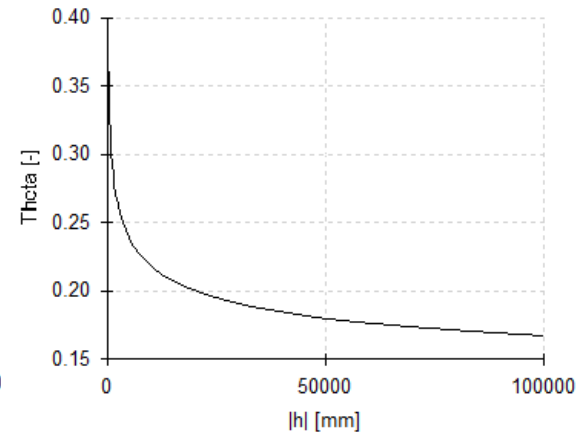
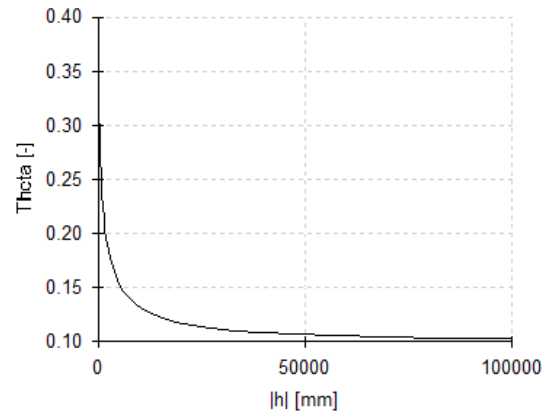
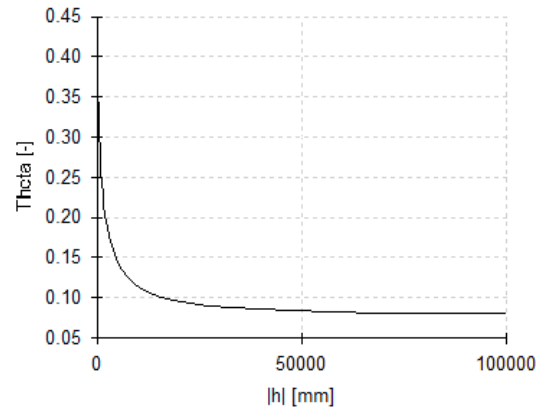


Figura 21. Curvas de retención de humedad simuladas en Hydrus-2D para cinco tipos de textura (franco arcillosos arenoso, franco, franco arcilloso respectivamente) a una profundidad de 30cm con el modelo Brooks-Corey (1964).

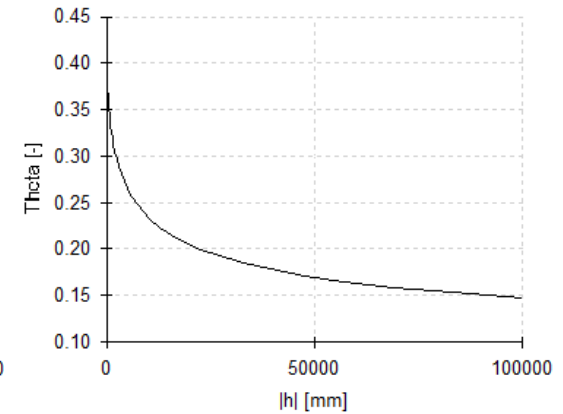
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



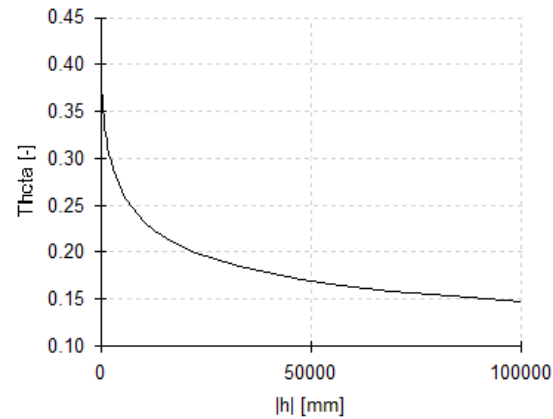
Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head



Hydraulic Properties: Theta vs. Head

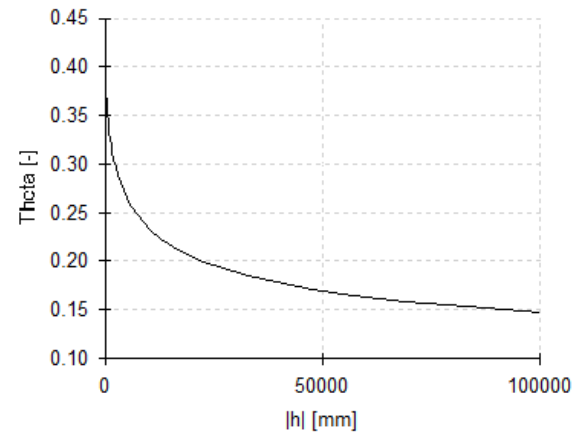


Figura 22. Curvas de retención de humedad simuladas en Hydrus-2D para cinco tipos de textura (franco arcilloso arenoso, franco, franco arcilloso respectivamente) a una profundidad de 30cm con el modelo Kosugi logNormal (1996).



## *Modelación de la Dinámica del Agua en el Suelo en la Parcela Experimental de la Universidad del Valle*